



BIOLOGÍA SINTÉTICA Y PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Un análisis en el marco de la teoría crítica
de la tecnología de Andrew Feenberg

Ariel Goldraj



Editorial CEA ▶ Colección Tesis



cea-sociales
centro de estudios
avanzados



Universidad
Nacional
de Córdoba

Biología sintética y producción de biocombustibles.
Un análisis en el marco de la teoría crítica de la tecnología
de Andrew Feenberg

Ariel Goldraj



Universidad
Nacional
de Córdoba

Colección Tesis

Biología sintética y producción de
biocombustibles. Un análisis en el marco
de la teoría crítica de la tecnología
de Andrew Feenberg

Maestría en Tecnología, Políticas y Culturas

Ariel Goldraj

Universidad Nacional de Córdoba

Rector: Dr. Hugo Oscar Juri

Decana de Facultad de Ciencias Sociales: Mgter. María Inés Peralta

Editorial del Centro de Estudios Avanzados

Centro de Estudios Avanzados, Facultad de Ciencias Sociales,
Av. Vélez Sarsfield 153, 5000, Córdoba, Argentina

Directora: Adriana Boria

Coordinación Ejecutiva: Alicia Servetto

Coordinación Editorial: Mariú Biain

Comité Académico de la Editorial

M. Mónica Ghirardi

Daniela Monje

Alicia Servetto

Alicia Vaggione

Juan José Vagni

Coordinadora Académica del CEA-FCS: Alejandra Martin

Coordinador de Investigación del CEA-FCS: Marcelo Casarin

Asesora externa: Pampa Arán

Cuidado de edición: Mariú Biain

Diagramación de Colección: Lorena Díaz

Diagramación de este libro: Silvia Pérez

Responsable de contenido web: Diego Solís

© Centro de Estudios Avanzados, 2022

Goldraj, Ariel

Biología sintética y producción de biocombustibles: un análisis en el marco de la teoría crítica de la tecnología de Andrew Feenberg / Ariel Goldraj - 1a ed. - Córdoba: Centro de Estudios Avanzados. Centro de Estudios Avanzados, 2022.

Libro digital, PDF - (Tesis)

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-48708-1-0

1. Biocombustibles. 2. Biotecnología. 3. Técnicas Agrícolas. I. Título.

CDD 306.46



Atribución-NoComercial:
Sin Derivadas 2.5. Argentina

Agradecimientos

A Darío Sandrone y Pablo Rodríguez por sus correcciones y sugerencias sobre este trabajo.

A los profesores y profesoras de la Maestría en Tecnología, Políticas y Culturas.

A los compañeros y compañeras con quienes compartí horas de clase en la Maestría de Tecnología, Políticas y Culturas.

Índice

Introducción	13
Capítulo I. Biología sintética o la vida bajo diseño humano	25
1.1. Los fundamentos de la biología sintética	25
1.2. Antecedentes históricos de la biología sintética	29
1.2.1. <i>La generación de “vida sintética”: de los cristales a las macromoléculas</i>	30
1.2.2. <i>La organización de la vida: de las macromoléculas a la biología molecular</i>	32
1.2.3. <i>La ingeniería de la vida: de la biología molecular a la biotecnología</i>	33
1.3. La ingeniería en la biología sintética: abstracción, modularización, estandarización	35
1.4. Las producciones de la biología sintética	39
1.4.1. <i>Construcción de piezas estándar de ADN (biobricks)</i>	39
1.4.2. <i>Modificación de rutas metabólicas</i>	40
1.4.3. <i>Síntesis de un genoma mínimo</i>	42
1.5. La biología sintética y la divisoria entre natural y artificial	47
Capítulo II. Biología sintética es tecnología: artefactos y organismos	51
2.1. La biología sintética y la tecnología	51
2.1.1. <i>Tecnología</i>	52
2.1.2. <i>El mundo artificial, la ingeniería y el diseño</i>	56
2.2. La naturaleza de los objetos tecnológicos	59
2.2.1. <i>Materia, Intención y Función</i>	60

2.3. Los productos de la biología sintética como objetos tecnológicos	70
2.4. Bioartefactos	73
2.5. La ontología de los bioartefactos en el nivel molecular	78
2.6. El control sobre las entidades vivientes	83
2.6.1. <i>¿Es la biología sintética una novedad radical de la biotecnología?</i>	85
Capítulo III. Los fundamentos de la teoría crítica de la tecnología	89
3.1. La concepción de la tecnología en la teoría crítica de Andrew Feenberg	89
3.2. Las teorías de la Tecnología	92
3.2.1. <i>Teoría instrumental</i>	92
3.2.2. <i>Teoría sustantivista</i>	96
3.2.3. <i>Teoría crítica de la tecnología</i>	98
3.3. Orígenes y fundamentos de la teoría crítica de la tecnología	101
3.3.1. <i>Tecnología y racionalidad social</i>	104
3.3.2. <i>La contribución de la teoría crítica de la tecnología</i>	107
3.4. Teoría de la instrumentalización	108
3.4.1. <i>Un ejemplo de instrumentalización primaria y secundaria</i>	112
3.4.2. <i>El problema de la neutralidad en la tecnología</i>	114
3.5. El diseño tecnológico	115
3.5.1. <i>El sesgo en el diseño</i>	118
3.6. La doble función de un artefacto: el código técnico	121
Capítulo IV. El código técnico de los biocombustibles	129
Parte A: Aspectos técnicos de la producción de biocombustibles	130
4.1. ¿Qué son los biocombustibles?	130
4.2. Emergencia y evolución histórica de la producción de biocombustibles	133
4.2.1. <i>Los comienzos de la industria de los biocombustibles</i>	134
4.2.2. <i>La consolidación de un mercado global</i>	135
4.2.3. <i>Las restricciones a los biocombustibles convencionales</i>	136
4.3. Estrategias metodológicas de la biología sintética para la producción de biocombustibles de cuarta generación	137

4.3.1. <i>Microorganismos productores de biocombustibles</i>	140
4.3.2. <i>Plantas y organismos fotosintéticos productores de biocombustibles</i>	142
Parte B: Aspectos sociotécnicos de la producción de biocombustibles	144
4.4. El código técnico de los biocombustibles	144
4.4.1. <i>El diseño predominante</i>	144
4.4.2. <i>El sesgo en el diseño adoptado</i>	148
4.4.2.1. <i>Uso alternativo de plantas cultivadas como alimento</i>	148
4.4.2.2. <i>Uso alternativo del suelo</i>	149
4.4.3. <i>La resistencia al código técnico predominante</i>	151
4.4.4. <i>Configuraciones alternativas para la producción de biocombustibles</i>	153
4.4.4.1. <i>Biocombustibles de segunda generación</i>	154
4.4.4.2. <i>Biocombustibles de tercera generación</i>	157
4.4.4.3. <i>Biología sintética y biocombustibles de cuarta generación</i>	158
4.5. La teoría de la instrumentalización en la tecnología de los biocombustibles	162
4.5.1. <i>Instrumentalización primaria</i>	162
4.5.2. <i>Instrumentalización secundaria: marco sociotécnico de la producción de biocombustibles</i>	166
Consideraciones finales	175
La trayectoria tecnológica de los biocombustibles en el marco de la teoría crítica	178
Bibliografía	185

Introducción

Sobre el final del siglo XX, la ciencia y la tecnología asistieron a la aparición de una nueva disciplina que rápidamente reclamó para sí un estatus propio dentro de la Biotecnología. Algo nuevo había cristalizado en la concepción de las entidades biológicas a partir de la reunión de los conocimientos y los avances tecnológicos acumulados en las últimas décadas. Estos conocimientos provenían de áreas muy disímiles, con tradiciones propias, y no registraban o mostraban solo una incipiente intersección previa. La Biología Molecular, la Bioquímica, la Ingeniería y la Informática habían sido las principales vertientes que confluyeron para dar identidad a la Biología Sintética, tal como fue denominada la nueva disciplina.

La biología sintética surge como una rama singular dentro de la biotecnología molecular. Su emergencia no ocurrió de manera aislada sino en un contexto de producciones excepcionales dentro del área, tales como el proyecto de secuenciación del genoma humano, los organismos genéticamente modificados para la producción de fármacos o el cultivo de embriones, entre otras (Newell-McGlouhlin y Re, 2006). Pero además, es en el área de la biotecnología en donde muchas producciones han encontrado una aplicación a escala global. Basta si no pensar, más allá de las múltiples controversias que el tema genera, en la enorme superficie que ocupan hoy los cultivos transgénicos en el planeta (Porcar y Peretó, 2014).

En pocos años la biología sintética ganó un espacio en la atención de la comunidad científica y en espacios institucionales, gubernamentales y privados. Pero el interés y el entusiasmo generado no quedó restringido a las comunidades académica y tecnológica. Desde diversos campos de la filosofía, la sociología y el arte, también comenzó a inda-

garse en torno a los nuevos significados y las implicancias sociales que la biología sintética traía consigo. En paralelo, los medios de comunicación comenzaron a difundir activamente las características y las potencialidades de la nueva disciplina (por ejemplo, véanse distintos enfoques multidisciplinarios sobre la biología sintética en Schmidt *et al.*, 2009; Boldt, 2016; Hagen, Engelhard y Toepfer, 2016).

¿Por qué, desde el momento mismo de su emergencia, la biología sintética motiva tanta atención y despierta tantas expectativas? Podríamos *a priori* identificar dos tipos de argumentos relacionados con los potenciales alcances de la disciplina. En primer lugar, apoyada en los principios básicos de la ingeniería, la biología sintética es presentada por sus principales promotores como un campo científico y técnico altamente novedoso, una nueva y poderosa herramienta cuyo propósito es extender a la esfera de lo viviente el mismo grado de eficiencia y control reservado, hasta ahora, al mundo artificial de los artefactos y las máquinas. Bajo esta premisa, la biología sintética se propone la creación de organismos o sistemas biológicos sin antecedentes en el mundo natural. Estos sistemas pueden ser originados a partir de la modificación de formas de vida preexistentes, con el objetivo de dotar a un organismo de una nueva función biológica. Además, en una dimensión que se presume aún más novedosa y radical, los mentores de la biología sintética plantean la posibilidad de crear en el laboratorio organismos *enteramente sintéticos*, es decir de generar vida *de novo*, sin que necesariamente medie ninguna base biológica natural previa. Se trataría entonces de nuevas formas de vida, enteramente artificiales, con un diseño y una función creadas “desde cero” por el ser humano.

En segundo lugar, como parte de la gran área de la biotecnología, la biología sintética se inscribe dentro de las llamadas tecnociencias (Echeverría, 2003). Más allá de los modelos experimentales y en escala de laboratorio, que ejemplifican cómo puede extenderse el límite del control humano sobre la materia viviente, el imaginario de la biología sintética concibe sus diseños y producciones en términos instrumentales, orientados hacia objetivos prácticos con una aplicación específica. Más aún, sus métodos se proponen como una nueva alternativa para diseñar las soluciones apropiadas a problemas acuciantes que enfrenta la humanidad, por ejemplo, en el campo de la energía, la salud y la alimentación. El desarrollo de la biología sintética es la principal expectativa sobre la que se sostiene la bioeconomía, esto es, una economía basada en el aprovechamiento de

organismos y procesos biológicos como una fuente renovable de recursos para la producción de alimentos, materiales y energía (Birner, 2018).

Uno de los pilares fundamentales en la transición hacia una bioeconomía, es el reemplazo de los combustibles fósiles por una fuente de producción de energía que sea renovable y sostenible en el tiempo. Los llamados biocombustibles son materiales producidos a partir de fuentes biológicas, vivientes o en forma de residuos, que se utilizan como fuente de energía. Los biocombustibles más importantes por su volumen de producción son el bioetanol y el biodiésel, combustibles líquidos empleados principalmente en el sector transportes que se utilizan como alternativas de la nafta o gasolina y el diésel producidos por la industria petroquímica. Aunque los biocombustibles comenzaron a experimentarse desde hace más de un siglo, su explotación de manera sistemática y global comenzó en las tres últimas décadas del siglo XX. Los principales argumentos esgrimidos en favor de la producción de biocombustibles se fundamentan en: a) la necesidad de una fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles, la cual constituye una reserva finita y en vías de agotamiento y, b) la reducción progresiva de la emisión a la atmósfera de los gases contaminantes y responsables del calentamiento global, principalmente del dióxido de carbono generado durante la utilización o “quemá” del combustible (Thompson, 2012a; Debnath, 2019).

Ahora bien, si por un lado la búsqueda de una fuente alternativa a los combustibles fósiles es un imperativo insoslayable, y por otra parte los biocombustibles constituyen una opción alternativa con alta probabilidad de concreción en el corto plazo, es lógico preguntarse entonces cómo abordar con un sentido crítico la tecnología actual y futura de la producción de biocombustibles. Esta reserva crítica es fundamental al menos por dos razones. La primera de ellas tiene un carácter más coyuntural y se refiere específicamente al diseño tecnológico que ha hegemónizado hasta el presente la producción de biocombustibles. El uso alternativo que se ha hecho de ciertas plantas –tradicionalmente cultivadas para la alimentación humana– como materia prima para la producción de biocombustibles, sumado a la remoción indiscriminada de vegetación natural para la producción de energía a partir de plantas, han desencadenado una serie de graves conflictos de naturaleza social, económica y ambiental. Aún así, esta modalidad de producción continúa siendo el procedimiento más utilizado en la actualidad como alternativa al uso de combustibles fósiles. La justificación general de los

grandes grupos que dominan la producción de biocombustibles para persistir con el diseño tecnológico vigente, se funda en su mayor eficiencia económica respecto a otros diseños alternativos (Schmidt *et al.*, 2012; Debnath, 2019). El concepto unívoco de eficiencia que emana de esta justificación no contempla los graves efectos negativos del diseño tecnológico en los diferentes contextos materiales, culturales y sociales de producción de biocombustibles. En todo caso los grupos dominantes proponen alguna forma de atenuación de los efectos no deseados de aquello que consideran el mejor diseño tecnológico posible.

La segunda razón para el abordaje crítico del diseño de producción de biocombustibles tiene un carácter más general. Se funda en la necesidad de enmarcar teóricamente, y de esta manera intentar trascender, dos posturas fuertemente arraigadas que hegemonizan las concepciones sobre la naturaleza de la tecnología y el cambio tecnológico. Por un lado, una concepción instrumentalista, basada en forma estricta en el planteamiento de una serie de objetivos a cumplir mediante la vía más eficiente posible desde el punto de vista económico. A esta visión instrumental de la tecnología responde el diseño actual, no solo de la producción de biocombustibles sino de buena parte de la tecnología en general. Por otro lado, una concepción que, refugiada en un esencialismo principista, sostiene un rechazo general de la tecnología y se manifiesta contraria a la introducción de cualquier innovación que eventualmente podría volver el sistema de producción de energía más eficiente y sostenible. Esta visión romántica y naturalista del mundo, que el filósofo Andrew Feenberg llama sustantivismo, satisface los contenidos de la teoría crítica tradicional que ve en el avance tecnológico un factor de dominación social. Pero en simultáneo, deja sin respuesta las expectativas de mejora en las condiciones de vida de millones de seres humanos, a través de un tipo de desarrollo tecnológico que eventualmente pueda satisfacer las demandas de las mayorías (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002).

En resumen, de no mediar una modificación en la concepción de la tecnología en general, y en el abordaje tecnológico específico de la cuestión de la energía, las dos visiones, instrumentalista y sustantivista, se volverían un serio obstáculo para mejorar el sistema de producción de biocombustibles mediante biología sintética. Por un lado, desde una perspectiva instrumentalista no existen garantías de que con la biología sintética, independientemente de su altísimo grado de sofisticación, no se privilegie a la eficiencia económica y se reproduzcan los mismos pro-

blemas que las tecnologías convencionales de obtención de biocombustibles han dejado expuestos. Por otro lado, una perspectiva sustantivista sería directamente contraria, por principio, a la introducción de la biología sintética como posible vía de solución a los problemas de escasez de energía en el mundo. Antes, en todo caso, abogaría por una reducción de la producción global de energía como respuesta a la escasez de este insumo.

Existe una tercera concepción en la interpretación del fenómeno de cambio tecnológico, alternativa a las visiones instrumentalista y sustantivista. Es la que propone Andrew Feenberg, quien ha desarrollado un marco teórico que designa como Teoría Crítica de la Tecnología. La piedra de toque de la teoría crítica radica en reconocer a los factores sociales que estructuran los sistemas técnicos. Esto complejiza la naturaleza de la tecnología, la cual es concebida entonces como un fenómeno socio-técnico antes que estrictamente técnico. Una interpretación intuitiva de este concepto puede llevarnos a pensar que Feenberg practica una suerte de eclecticismo virtuoso que intenta una fusión de lo mejor que tiene cada una de las perspectivas teóricas de la tecnología. Así, el autor consideraría a los aspectos técnicos como instrumentos indispensables para el desarrollo y la innovación que marcarían el rumbo del progreso de la humanidad. Pero el progreso no debería asumirse como una verdad absoluta que se justifica en sí misma o un *a priori* inevitable. Por el contrario, las consecuencias negativas de las aplicaciones tecnológicas deberían ser mediatizadas y limitadas por el contexto social en que se despliega un desarrollo tecnológico.

En verdad Feenberg practica un cierto eclecticismo, pero más bien se trata de uno de tipo reflexivo. Antes que un híbrido formado por la simple suma de los componentes positivos de cada teoría, el autor toma estos componentes para poder trascenderlos en una nueva teoría que revela un factor fundamental: el carácter político de la tecnología y la posibilidad de transformarla mediante la agencia de los actores implicados.

Feenberg desarrolla una explicación que revela cómo se genera y dónde reside la carga o componente político inherente a la tecnología. Pero aún va más allá, y a partir de considerar la tecnología como fenómeno mediador de prácticamente todos los actos cotidianos de la vida en sociedad, desde las instancias privadas hasta los mega procesos de comunicación y producción económica, Feenberg sostiene que un cambio en la concepción y las prácticas de la tecnología abriría las puertas a una

transformación de alcance mucho mayor aún, que ponga en cuestión las mismas bases del capitalismo (Feenberg, 2002).

Para explicar la naturaleza social de la tecnología, Feenberg propone una teoría de la instrumentalización; esto es, un mecanismo de realización de los objetos tecnológicos como tales. La instrumentalización opera en dos niveles diferentes, si bien, como se analizará más adelante, ambos están estrechamente relacionados. El nivel de instrumentalización primaria se refiere a la revelación de los objetos mundanos como simples recursos o materias primas. Se trata de una manera de ver el mundo en la cual, al ser percibidos en términos puramente instrumentales y necesariamente orientados hacia el cumplimiento de un fin útil, los objetos son descontextualizados de su entorno natural. Es lo que Feenberg caracteriza como la orientación técnica hacia la realidad. En el siguiente nivel de instrumentalización, designado como instrumentalización secundaria, el objeto descontextualizado es recontextualizado nuevamente en un entorno social específico, para cobrar ahora el carácter de objeto tecnológico. En consecuencia, los dos niveles de instrumentalización contribuyen a definir la configuración del diseño de un objeto tecnológico en particular y de la tecnología en general (Feenberg, 2002).

En contraste a una visión instrumentalista –la forma predominante de concebir la tecnología en las sociedades industriales–, Feenberg sostiene que los sistemas técnicos no son neutrales. El cuestionamiento a la idea de neutralidad no se refiere a la instancia de aplicación de la tecnología (la cual, desde luego, puede ser “mala o buena”) sino que se enfoca en una instancia previa a la aplicación, la etapa del diseño del objeto o proceso tecnológico. A partir de los aportes de la teoría constructivista referidos a los procesos de construcción social del conocimiento científico y técnico, la teoría crítica de Feenberg considera al diseño tecnológico como la resultante de una confrontación de intereses (Feenberg, 2017a). El sentido de esta disputa, enablada por la diversidad de actores próximos al objeto del diseño, no es la búsqueda de una verdad objetiva; aunque desde luego se trata de una puja no exenta de una lógica de racionalidad técnica. Más bien, aunque los argumentos adopten una forma y un contenido de discusión técnica, cada actor pugna por hacer prevalecer sus intereses particulares y consolidar una posición jerárquica. Esta disputa no se restringe únicamente a las circunstancias inmediatas de carácter político y económico que definen los intereses de cada parte. La teoría crítica propone que la configuración final del diseño también

se ve influenciada por una dimensión sociológica más general y compleja, a la cual Feenberg llama racionalidad social (Feenberg, 2008; Feng y Feenberg, 2008; Feenberg, 2011). La racionalidad a la que se refiere Feenberg está anclada en una concepción unívoca de la tecnología y en saberes y hábitos naturalizados, que justamente por su condición de tales, “permean” en la escena del diseño y se presentan como verdades incuestionables. El obstáculo para trascender esta racionalidad se acrecienta en la medida en que el análisis de un diseño solo involucra a profesionales técnicos y no a la diversidad de actores implicados en todo desarrollo tecnológico. Una discusión de tipo horizontal que reúna no solo a ingenieros sino también a usuarios y público, entre otros grupos, podría conducir a un análisis más contextual y reflexivo que exceda los aspectos estrictamente técnicos y cuestione la racionalidad social imperante (Feenberg, 1999).

Si el diseño es efectivamente el resultado de una disputa de intereses, luego la configuración que adquiera un objeto tecnológico necesariamente es portadora de un sesgo. Sin embargo, Feenberg sostiene que el diseño final adoptado se presenta en apariencia como algo neutral y objetivo, justificado en términos estrictamente técnicos de eficiencia y rendimiento. A esta justificación, el autor la llama código técnico o código de diseño. Quizás la aproximación más sencilla de las varias que el autor ensaya sobre el concepto de código técnico es aquella que lo define como “la realización de un interés bajo la forma de una solución técnicamente coherente a un problema” (Feenberg, 2005: 114). Así, el código técnico de un artefacto resulta ser una norma para su diseño, construida a partir de los fundamentos de actores hegemónicos que reúnen la fuerza suficiente para imponer sus intereses particulares. Usualmente, estos intereses no se explicitan de manera abierta sino que permanecen eclipsados en el mismo diseño, detrás de una racionalidad técnica y también de una racionalidad social, que expresa valores de sentido común propios de la época. En suma, los intereses particulares quedan incorporados en el diseño, aunque este se presente de una forma lógica que aparenta favorecer a una amplia mayoría antes que a un grupo particular.

El código técnico constituye el marco normativo que justifica la implementación de tecnologías de manera autónoma por parte de los actores dominantes. Eventualmente, estas tecnologías pueden resultar lesivas para otros grupos diferentes de actores que en principio no tienen participación en el proceso de diseño. El papel que asumen estos grupos,

a los que Feenberg designa como actores subordinados, es otra faceta del carácter social de la tecnología. La teoría crítica rescata la posibilidad de resistencia a la dominación de grupos hegemónicos ejercida mediante la tecnología. Esta resistencia de los actores subordinados se erige como una vía para la reconsideración democrática del diseño y la modificación de los códigos técnicos (Feenberg, 2005).

La concepción de los organismos vivos como biofactorías para la producción de biocombustibles aparece como una alternativa técnicamente lógica, justificada y eficiente para solucionar el problema de la escasez de energía en el planeta. En esta lógica se inscribe el diseño actualmente predominante para la producción de biocombustibles a partir de plantas. Por otra parte, la producción de biocombustibles a partir de organismos modificados mediante biología sintética es presentada como una alternativa tecnológica nueva, altamente sofisticada, sustentable desde el punto de vista ambiental y potencialmente más eficiente que el diseño de producción vigente en la actualidad.

La hipótesis que se argumenta en este trabajo propone, en primer lugar, que el diseño tecnológico actual de producción de biocombustibles a partir de plantas no tiene un carácter neutral. Más allá de la argumentación técnica o de los imperativos tecnológicos que lo sostienen, el análisis sociotécnico en el marco de la teoría crítica de la tecnología revela un código técnico que incluye un sesgo en favor de los grupos hegemónicos que dominan la producción de biocombustibles. En segundo lugar, la introducción de los proyectos de biología sintética en la producción de biocombustibles, aún con su innegable grado de novedad y alto nivel de sofisticación técnica, no garantizan *per se* una modificación del escenario actual de actores dominantes y subordinados (Feenberg, 2005). De no mediar una transformación conceptual en los mecanismos de discusión del diseño, se mantiene la posibilidad de reproducir la misma problemática derivada de los diseños vigentes actualmente en la producción de biocombustibles. Sostendremos además, en acuerdo con la teoría crítica de Feenberg, que las tensiones entre los distintos actores, abren la posibilidad de considerar diseños alternativos al actual.

El objetivo de este trabajo es analizar el modo de producción actual y las potencialidades de la biología sintética en el área de los biocombustibles en el marco de la teoría crítica de la tecnología de Andrew Feenberg. En ese marco general, nos proponemos una serie de objetivos específicos tales como:

- Conceptuar los diseños y aplicaciones más relevantes de la biología sintética, colocando el foco principal en aquellos relacionados con la producción de energía.

- Ensayar una caracterización ontológica de las producciones de la biología sintética.

- Analizar los conceptos de la teoría crítica de la tecnología y relacionarlos con la biotecnología y la biología sintética orientada a la producción de biocombustibles.

- Discutir las diferentes alternativas de diseño y los códigos técnicos del proceso de producción actual de biocombustibles y de sus proyecciones futuras mediante el uso de técnicas de biología sintética.

Estructura de este libro

El trabajo se desarrolla en bloques temáticos divididos en cuatro capítulos. El primer bloque ensaya una reconstrucción de los antecedentes que conducen al surgimiento de la biología sintética, indaga sobre los rasgos que la definen como disciplina y describe la clase de productos que la biología sintética construye. Estos productos, en tanto objetos tecnológicos, son luego examinados desde un enfoque filosófico que analiza su estatus ontológico singular derivado de su doble condición de organismos naturales y artefactuales. Asimismo se discute el significado y alcance de la analogía entre máquinas y organismos que propone la biología sintética. Estos temas abarcan los capítulos I y II del trabajo.

El siguiente bloque se desarrolla en el Capítulo III e introduce la teoría crítica de Andrew Feenberg como marco teórico general para el análisis de la tecnología y el cambio tecnológico. Aquí se exploran los orígenes conceptuales de la teoría crítica que conducen a identificar a la tecnología como un factor de poder en las sociedades modernas. Asimismo, la teoría crítica es contrastada con dos concepciones alternativas de la tecnología, el instrumentalismo y el sustantivismo. Se discuten las dos vertientes teóricas que sustentan la teoría crítica: el esencialismo heideggeriano y la corriente constructivista de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología. Hacia el interior de la teoría crítica nuestro análisis se concentra en tres conceptos fundamentales: la teoría de la instrumentalización de los objetos tecnológicos, el diseño tecnológico y el código técnico.

El cuarto bloque se desarrolla en el Capítulo IV y aborda la proble-

mática de la producción de energía en la forma de biocombustibles. Por una parte, se indaga la trama sociotécnica que conduce al diseño actual de producción de biocombustibles a partir de plantas, describiendo el rol de los diferentes actores en el sistema de producción. Por otra parte, se examinan los proyectos en curso para la producción de biocombustibles de avanzada a partir de organismos modificados mediante biología sintética.

El tramo final del trabajo ensaya un cruzamiento de los diferentes bloques alrededor del concepto feenbergiano de código técnico. En primer lugar, el concepto es aplicado al diseño actual de producción de biocombustibles. En segundo lugar el concepto se aplica para analizar las proyecciones a futuro de la biología sintética en el área de los biocombustibles. Se argumenta que, más allá del grado de sofisticación en el control de los organismos biológicos que alcancen las técnicas de biología sintética, es necesaria una transformación conceptual en los mecanismos de discusión de los diseños implementados, para evitar reproducir la misma problemática derivada de los diseños actualmente vigentes en la producción de biocombustibles.

Desde luego no se pretende ni está a nuestro alcance agotar los múltiples enfoques posibles para abordar el problema de la provisión de energía en el planeta desde una dimensión sociotécnica. Lo mismo podemos decir con respecto a la diversidad de interpretaciones que supone el fenómeno de la biología sintética en el campo de las ciencias sociales y las humanidades. Más allá de esto, existen una serie de razones por las cuales consideramos relevante el trabajo aquí expuesto. En primer lugar, la intersección de la tríada biología sintética, biocombustibles y teoría crítica de la tecnología. Si los promotores de la biología sintética atribuyen a la nueva disciplina un carácter eminentemente tecnológico, y si uno de los focos emblemáticos de la biología sintética es la modificación de organismos para la producción de biocombustibles, luego, un enfoque crítico que reúna todos estos conceptos requiere de una *teoría crítica específica sobre la tecnología*. Sostenemos que el marco teórico construido por Andrew Feenberg satisface esa demanda. Desde ya que un enfoque crítico resulta fundamental para descartar cualquier visión utilitarista de la tecnología que reduzca esta a una mera cuestión instrumental. Pero también, el enfoque crítico se vuelve necesario para evitar caer en un juicio de corte esencialista, imbuido de un carácter antitecnológico y que suele sostener un rechazo *a priori* de los procesos

de innovación técnica. En segundo lugar, ya al interior de la teoría crítica de Feenberg, señalamos la importancia de analizar el concepto de código técnico en relación específica a la producción de energía a partir de organismos vivos. El análisis sociológico implicado en este concepto resulta fundamental para revelar, por encima de las justificaciones de orden estrictamente técnico, la trama de intereses particulares que son objetivados en el diseño tecnológico. Finalmente, en tercer lugar, esperamos que el enfoque de problemas biotecnológicos específicos desde la teoría crítica de la tecnología contribuya en algún sentido a diversificar la formación académica en el campo de la biotecnología. El grado de intervención de la técnica en la esfera molecular de los organismos y la rapidez con que los nuevos hallazgos derivan en aplicaciones prácticas advierten sobre la importancia de una formación científica y profesional integral que contemple el contexto material, social y cultural en el que se desarrollan las aplicaciones biotecnológicas.

Capítulo I. Biología sintética o la vida bajo diseño humano

1.1. Los fundamentos de la biología sintética

Una primera impresión sobre la expresión biología sintética sugiere una suerte de oxímoron y produce una cierta extrañeza semántica. La biología, incluida al interior de las ciencias naturales, es la ciencia del estudio de la vida, la cual se reconoce como parte del mundo natural. Por el contrario, la voz sintética nos remite a algo proveniente del mundo artificial, incluido en un área del conocimiento aplicado que nos aproxima a la ingeniería. ¿Cómo se asocian estos dos mundos, en apariencia tan divergentes y hasta contradictorios? Aquello que fabricamos en el dominio de la técnica, como un edificio, un puente o un circuito electrónico, ¿no está efectivamente bajo nuestro control? Y por el contrario, ¿no es la vida, como fenómeno natural, algo sometido a su propia normatividad y autocontrol? Si bien desde los mismos inicios de la historia humana el límite entre lo natural y lo artificial comienza a volverse crecientemente difuso (B. Preston, 2013; Parente, 2018), la llamada biología sintética propone de forma expresa y deliberada asociar estas dos dimensiones, a las cuales de manera intuitiva interpretamos como opuestas y separadas por límites más o menos precisos.

Drew Endy, uno de los padres fundadores de la biología sintética, proporciona una definición inicial muy sencilla y gráfica de la nueva disciplina: “la biología sintética es la tecnología de la ingeniería aplicada a los sistemas biológicos” (Endy, 2005: 449)¹. Como mencionáramos en la introducción de este trabajo, la biología sintética es una disciplina reciente que emerge a partir de la reunión de conocimientos de disci-

¹ La traducción de las citas en inglés pertenece al autor.

plinas previas, principalmente la ingeniería, la informática y la biología celular y molecular. El objetivo principal de la biología sintética es el diseño y la construcción de sistemas biológicos. Este objetivo puede concretarse a partir de la creación, mediante síntesis artificial, de parte o de la totalidad de los componentes moleculares básicos de estos sistemas. Los sistemas construidos por la biología sintética pueden ser incorporados a formas de vida preexistentes con el objetivo de dotar a un organismo de nuevas funciones biológicas. Asimismo, la biología sintética vislumbra la posibilidad de crear organismos *enteramente* sintéticos: se trata de nuevas formas de “vida artificial”, sin existencia previa en la naturaleza, con un diseño y una función *creadas* por el ser humano. La construcción de estos sistemas biológicos puede concretarse a partir de materiales naturales, sintéticos, o bien de la reunión de ambos tipos de materiales (Lam, Godinho, Martins dos Santos, 2009).

Es importante establecer algunas precisiones iniciales acerca del alcance del término “artificial” ya que va a presentarse con frecuencia a lo largo de todo este trabajo. Intuitivamente, lo artificial se relaciona con los objetos creados mediante la intervención humana y también, en la esfera biológica, con los organismos creados en las últimas décadas producto del avance de las técnicas de biología molecular e ingeniería genética. Pero no solo estas técnicas ultrasofisticadas y cuyos fundamentos se apoyan en el nivel molecular definen el terreno de lo artificial en los organismos. También las prácticas de domesticación de animales y plantas, de origen ancestral, generan organismos que pueden ser legítimamente designados como artificiales, ya que han sido modificados y adaptados a los objetivos y propósitos humanos (Simon, 1996). En cualquier caso, y a los fines de distinguir correctamente la singularidad de los productos de la biología sintética, las plantas y animales domesticados son organismos artificiales o bioartefactos creados a partir de la modificación de estructuras naturales preformadas (Parente, 2014). En contraste, la biología sintética propone, además de la modificación de organismos preexistentes, la creación de organismos enteramente artificiales, es decir construidos a partir de la síntesis y el ensamble de novo de sus estructuras más elementales. La naturaleza de esta diversidad de organismos artificiales será abordada en detalle en el Capítulo II de este trabajo.

A partir de sus potencialidades, la biología sintética ha logrado exponer nuevamente en la superficie el debate en torno al origen de la vida. Esta discusión gira en torno a la posibilidad de recrear en el labo-

ratorio las condiciones que condujeron al surgimiento de la vida sobre el planeta. O bien, como ya se ha mencionado, a partir de la capacidad de crear un organismo completo de manera artificial. Las bases materiales que proporciona la biología sintética para la resignificación de este debate son ciertas y fuertes, pero también lo es cierto grado de sensacionalismo que históricamente ha condimentado el problema y las prácticas experimentales alrededor de la “creación de vida” desde sus cimientos más elementales (Porcar y Peretó, 2014).

Ahora bien, la biología sintética está lejos de ocuparse únicamente de cuestiones tan trascendentales para la ciencia y la filosofía como el origen de la vida o la posibilidad de crear vida artificial. Sus partidarios más entusiastas también la presentan como una posible solución a los graves problemas que afectan a nuestro planeta. Una particularidad de la biología sintética es que sus diseños y producciones están mayoritariamente orientados a una aplicación práctica con una utilidad económica. La biología sintética ha sido concebida desde sus inicios como una expresión acabada de la tecnociencia, donde la experimentación parece ser indisoluble de la innovación con fines utilitarios (Echeverría, 2003; Morange, 2009a; Mackenzie, 2013). Podemos ensayar entonces una primera caracterización general de la biología sintética como una rama emergente de la biotecnología que combina el conocimiento y los métodos de la biología y la ingeniería para diseñar y construir organismos a partir de materiales naturales o sintéticos, con el objetivo de obtener de ellos algún tipo de utilidad (Schmidt *et al.*, 2012).

Lo cierto es que como un campo de emergencia reciente, aún no existe una definición unívoca de la biología sintética, como sí ocurre con otras disciplinas tradicionales con una larga trayectoria de consolidación como la Biología, la Física o la Matemática. No obstante, en cualquier caracterización de la biología sintética aparecen conceptos similares que remiten a la modificación a través del diseño y el control al nivel molecular de la materia viviente. Una comunidad de expertos de la *European Commission* (2005) ha definido a la biología sintética como:

la ingeniería de la biología: la síntesis de sistemas biológicos complejos con funciones que no existen en la naturaleza. Esta perspectiva ingenieril puede ser aplicada en todos los niveles de jerarquía de las estructuras biológicas, desde las moléculas individuales hasta una célula, los tejidos y organismos. En esencia, la biología sintética posibilitará el diseño de sistemas biológicos de una forma sistemática y racional (p. 5).

Por otra parte, un informe oficial del gobierno de Estados Unidos define la biología sintética de manera similar, a la par que enfatiza una perspectiva pragmática o de aplicación económica, antes que epistémica. En ese marco, considera a la biología sintética una nueva tecnología, destinada a aplicar técnicas estándar de la ingeniería con el objetivo de crear nuevos organismos o sistemas biológicos con funciones específicas. A través de estas funciones se espera contribuir a dar solución a un sinnúmero de necesidades en salud, alimentación y ambiente (*Presidential Commission for the Study of Bioethics*, 2010: 46).

De acuerdo a Morange (2009a), las características específicas más importantes de la biología sintética son: a) el diseño y la construcción de sistemas biológicos a partir de la síntesis artificial de los componentes moleculares básicos de estos sistemas; b) el enfoque ingenieril aplicado a los sistemas biológicos, lo que implica el diseño racional a través del modelado matemático y computacional del sistema bajo estudio (en ocasiones la biología sintética ha sido también denominada bioingeniería) (Endy, 2005); c) la construcción basada en partes o módulos de ADN, denominados *biobricks*, los cuales son introducidos en distintos tipos de organismos con el objetivo de dotar a estos de una cierta función (Porcar y Peretó, 2014).

Es importante establecer las diferencias entre la biología sintética y la biología de sistemas, dos campos de investigación que se encuentran estrechamente relacionados y que han surgido en forma contemporánea (Morange, 2009a). Ambas disciplinas son parte de la llamada era posgenómica, en la cual, gracias a los desarrollos tecnológicos para la secuenciación de ácido desoxirribonucleico (ADN) y el procesamiento de datos, es posible acceder y analizar información biológica en gran escala. La biología de sistemas se basa en una mirada integradora al interior y entre cada uno de los módulos o subsistemas que definen a un organismo. Esto abarca el estudio simultáneo de las relaciones entre fenómenos como la expresión de genes, la actividad de enzimas y la regulación metabólica dentro de un sistema biológico. La biología sintética comparte con la biología de sistemas la visión modular de los organismos, pero se enfoca en el diseño y la construcción de sistemas biológicos artificiales con el objetivo de lograr el máximo control posible sobre los procesos biológicos (Lam *et al.*, 2009; Morange, 2009a).

La biología sintética se distingue también de la ingeniería genética. Esta última es una técnica dentro de la biología molecular, utilizada ru-

tinariamente en cualquier emprendimiento biotecnológico. La ingeniería genética utiliza técnicas para modificar organismos previamente existentes; las modificaciones introducidas no alteran de manera sustancial la estructura y el metabolismo de estos organismos que son el resultado de una historia evolutiva que se mantiene sin mayores alteraciones. En cambio, el propósito de la biología sintética va más allá de la modificación puntual de organismos. Más bien, la biología sintética procuraría el diseño “desde cero” de un organismo enteramente nuevo, sin que necesariamente medie una relación filogenética con un linaje de ancestros; esto es, sin una historia evolutiva previa (Parente, 2018). Para graficar la diferencia con la ingeniería genética, los promotores de la biología sintética recurren al contraste entre una acción tentativa, de tipo artesanal, con una acción meticolosamente diseñada, de tipo ingenieril. Aunque el producto final obtenido pueda ser similar e igualmente exitoso, lo que varía aquí es el perfil cognitivo y la forma en que se concibe el proceso de producción de un organismo modificado (B. Preston, 2013).

Más adelante se analizarán con más detalle los conocimientos científicos y los desarrollos tecnológicos que proporcionan el fundamento para la reciente aparición de la biología sintética. Sin embargo, como observa Parente (2018), desde el punto de vista metodológico, el intento de controlar a los organismos vivos a través del diseño racional no es novedoso en sí mismo. Aunque la biología sintética quizás constituya el emprendimiento más acabado en el ejercicio de control de lo vivo, desde hace más de un siglo existe una rica historia de intentos en esa dirección.

1.2. Antecedentes históricos de la biología sintética

A comienzos del siglo XIX Lamarck introduce el término “Biología” para distinguir a la ciencia que se ocupa del fenómeno de la vida. En las décadas siguientes, se formulan las grandes teorías de las Ciencias Naturales que establecen los principales fundamentos de los organismos vivos. La teoría celular de Schwann y Virchow identifica a la célula como la unidad de organización de todos los seres vivos. Los cruzamientos de plantas llevados a cabo por Mendel asientan las bases de las leyes de la herencia. Las demostraciones de Pasteur revelan la falacia de la generación espontánea de vida y ponen en retirada al vitalismo. Darwin postula el origen común de las especies vivientes y la selección natural

como motor de la evolución. En conjunto, estas teorías explicaron los mecanismos de generación, desarrollo y transmisión de los procesos vitales (Keller, 2002). La biología comienza luego a ocuparse de dos problemas más específicos, relacionados entre sí y con estrecha conexión con la biología sintética: la generación artificial de vida en el laboratorio y el origen de la vida sobre La Tierra.

1.2.1. La generación de “vida sintética”: de los cristales a las macromoléculas

En rigor, el término biología sintética no es nuevo ya que fue acuñado por primera vez casi un siglo antes de su aparición formal como disciplina biotecnológica. Desde comienzos del siglo XX es posible identificar discursos y prácticas científicas estrechamente relacionadas con los interrogantes sobre los fundamentos y el origen de la vida. La idea más arraigada en aquella época era que para poder responder esos interrogantes de manera efectiva, el fenómeno de la vida debía ser abordado mediante la experimentación, enfocada a la generación de vida artificial en el laboratorio (Keller, 2002)². En su trabajo con sales de radio, John Burke logró obtener en 1906 una “sopa orgánica” con diminutas formaciones que se asemejaban a microorganismos. Estas estructuras eran consideradas como un cierto tipo de “vida artificial” (Campos, 2009). Stéphane Leduc utiliza por primera vez la expresión *biología sintética* en 1902, mientras estudia los procesos de ósmosis y difusión en estructuras cristalinas. En sus “jardines químicos”, tal como él mismo los bautizara, Leduc observaba estructuras que llamó “organismos artificiales”, no tanto con la convicción de que fueran verdaderas entidades vivientes, sino más bien por su extraordinaria similitud morfológica con los procesos de división y crecimiento de las células más elementales (Keller, 2002). Conceptos similares fueron esgrimidos por Alfonso Herrera en México, quien en las primeras décadas del siglo XX acuñó el término

² En relación a los intentos de generar “vida artificial”, Keller remarca la distinción entre dos conceptos: producción de vida artificial y producción artificial de vida. El primer concepto está relacionado con las experiencias para originar vida a partir de un organismo, mediante partenogénesis o gemación, un tipo de reproducción asexual frecuente en la naturaleza. El segundo concepto se relaciona con las experiencias para originar vida a partir de materia inanimada. Ambos tipos de búsqueda fueron comunes en la “biología sintética” de principios del siglo XX (Keller, 2002).

plasmogenia para referirse a la experimentación enfocada en la generación de vida a partir de materia inorgánica. En base a sus similares propiedades físico-químicas, Herrera estaba convencido de que existía una continuidad entre la materia inerte y la materia viviente (Porcar y Peretó, 2014). Sin duda, hoy suena extravagante o absurdo pensar que la ósmosis y la difusión sean fuerzas capaces *per se* de engendrar vida a partir de cristales o precipitados coloidales. Pero analizados en el contexto de la época, estos estudios fueron importantes al menos por dos razones. Primero, contribuyeron a reforzar una concepción materialista sobre el origen de la vida la cual, aún después de Pasteur, estaba en disputa con las ideas vitalistas (Peretó, 2016). Segundo, el concepto de *síntesis* de vida artificial comenzó a ser asociado no solo al análisis teórico sino también a la experimentación, acorde con una visión similar a la que sostiene la biología sintética actual.

También Jacques Loeb en 1912 sostuvo la idea de que entender el fenómeno de la vida implicaba tener la capacidad de producirla artificialmente. Significativamente, Loeb habla de “fisiología sintética” y “tecnología de la sustancia viviente” y argumenta que la biología debía ser considerada como un campo de aplicación de los principios de la ingeniería (Campos, 2009; Azevedo-Rocha, 2016). Sin embargo, Loeb también remarcó la existencia de límites precisos entre la materia viva y la materia inanimada. Por este motivo, rechazó la idea de la generación artificial de vida a través de fenómenos como la ósmosis o la precipitación de coloides. Sobre el final de su carrera, sus estudios sobre proteínas contribuyeron a enfocar la esencia del fenómeno de la vida en la síntesis química de las macromoléculas biológicas, antes que en las similitudes de forma y en los procesos físico-químicos comunes entre compuestos inertes y células (Deichmann, 2012). La visión de Loeb marca un punto de inflexión en la experimentación para comprender la génesis de vida. A partir de entonces, los intentos de creación de vida artificial fueron dejados de lado casi completamente y la expresión biología sintética cayó en desuso hasta finales del siglo XX³. A partir de los años 30 del

³ Aunque la experimentación para producir vida sintética fue dejada de lado por varias décadas, la cuestión del origen de la vida sobre La Tierra continuó siendo abordada teórica y experimentalmente durante el siglo XX. Aleksander Oparin sostenía que la aparición de vida fue producto de una evolución química impulsada por las condiciones atmosféricas primigenias existentes en nuestro planeta. A principios de los años 50, simulando en un tubo de ensayo la composición química y las condiciones atmosféricas en el planeta previas

siglo pasado, el nuevo enfoque en torno al fenómeno de la vida comenzó a centrarse en la estructura y la bioquímica de las moléculas de proteína y ADN. De esta forma quedaban conformados los cimientos para el nacimiento de una nueva disciplina: la biología molecular

1.2.2. *La organización de la vida: de las macromoléculas a la biología molecular*

En los años 20 del siglo pasado se conocía efectivamente que los cromosomas estaban presentes en todos los organismos vivientes. Se sabía también que estaban constituidos por proteína y ADN y que eran transferidos de la generación parental a la progenie. Por lo tanto, la búsqueda de las causas del fenómeno de la vida estaba ahora orientada al estudio de estas macromoléculas; la proteína y el ADN eran los candidatos naturales para albergar los genes, las estructuras que presuntamente contenían los rasgos heredables de los seres vivos. Luego del aislamiento en estado cristalino del virus del mosaico del tabaco llevado a cabo por Stanley en 1935, la controversia en torno a la molécula portadora de la información genética parecía volcarse hacia la proteína (Morange, 2009b; Deichmann, 2012). En su tratado *¿Qué es la vida?*, publicado en 1944, Erwin Schrödinger propuso que el material hereditario era un tipo de cristal irregular o aperiódico de naturaleza proteica, lo suficientemente estable como para poder conservar la información genética de un organismo a través de las diferentes generaciones⁴. Este cristal estaría dotado de una cierta versatilidad que lo haría diferente de los cristales inorgánicos, caracterizados por la repetición periódica de su estructura

a la aparición de la vida, Stanley Miller y Harold Urey lograron demostrar la producción de una serie de aminoácidos similares a los que forman las proteínas de los organismos vivientes. Siguiendo la misma hipótesis, diversos experimentos realizados en los años posteriores lograron producir varios de los compuestos básicos que conforman la estructura de los ácidos nucleicos y las membranas biológicas (McCollom, 2013).

⁴ Deichmann (2012) observa en el modelo de Schrödinger un regreso a escena de los cristales en las hipótesis para explicar las causas del fenómeno de la vida. Pero el cristal aperiódico que postula Schrödinger es muy diferente a los cristales periódicos de naturaleza inorgánica, en los cuales Leduc encontraba una conexión entre la materia inanimada y los “organismos” vivientes. Según Schrödinger, la diferencia en la estructura de ambos tipos de cristales “es la misma que existe entre un empapelado en la pared, en la cual el mismo patrón está repetido una y otra vez con periodicidad regular y una obra maestra de bordado, un tapiz de Rafael, el cual no muestra una repetición aburrida, sino un diseño elaborado, coherente y cargado de sentido, trazado por un gran maestro” (Schrödinger, 1944: 5).

espacial. El modelo propuesto podría explicar entonces las variaciones observadas entre diferentes individuos y especies (Schrödinger, 1944). La controversia fue resuelta definitivamente por Oswald Avery, quien demostró en 1944 que era el ADN y no la proteína la molécula portadora de la especificidad genética (Morange, 2009b)⁵.

La era de la biología molecular logró discernir la naturaleza de los mecanismos que sostienen el fenómeno de la vida desde sus fundamentos estructurales más elementales. La siguiente etapa se caracterizó por el surgimiento de diversas formas de control sobre esos mecanismos mediante la acción técnica. La intervención humana en el nivel molecular dio lugar a una nueva ingeniería o tecnología sobre la vida, conocida como la Biotecnología molecular.

1.2.3. La ingeniería de la vida: de la biología molecular a la biotecnología

Una serie de hallazgos y desarrollos concretados a lo largo de la segunda mitad del siglo XX cimentaron el comienzo de la biotecnología mo-

⁵ El ADN está conformado por nucleótidos cuya estructura básica consiste en un azúcar unido a un grupo fosfato y a una base nitrogenada. Existen cuatro clases de bases nitrogenadas diferentes, simbolizadas como A, T, G y C. La hipótesis sobre la estructura tridimensional del ADN, dada a conocer en 1953 por Watson y Crick, postulaba que la molécula se organiza en dos cadenas dispuestas en forma de hélice cuyos eslabones son cada uno de los cuatro nucleótidos unidos entre sí. Además de ser consistente con los hallazgos experimentales de difracción de rayos X, esta estructura daba cuenta de la forma en que la información genética se duplicaba y se transmitía a la descendencia; es decir, explicaba la transmisión de la herencia en el nivel molecular. Los nucleótidos se organizan en diferentes secuencias que definen los genes y las regiones regulatorias que modulan la actividad de esos genes. El conjunto de genes guarda la información para llevar a cabo el programa vital de cada organismo. De manera que los genes son porciones de ADN que portan instrucciones específicas, escritas como diferentes secuencias de un alfabeto de cuatro letras. Esa información almacenada en forma de código es primero transcrita en el ácido ribonucleico (ARN) mensajero y luego traducida en 20 aminoácidos diferentes. Los aminoácidos son las unidades estructurales que enlazadas entre sí conforman las proteínas. La lectura del llamado código genético, la regla de correspondencia entre nucleótidos y aminoácidos, se hace en bloques de tres bases llamados codones; cada codón codifica la información para un aminoácido determinado. Las proteínas, los productos finales de la traducción del código, son los agentes químicos “ejecutores” que llevan a cabo, en última instancia, las instrucciones codificadas en el ADN. El código genético fue descifrado completamente en 1966, luego de investigaciones que en conjunto abarcaron cerca de 20 años (Morange, 2009b).

derna. El descubrimiento de las enzimas de restricción a comienzos de los años 70, literalmente redireccionó el curso de las estrategias de investigación en el área de la biología molecular. Estas enzimas cortan el ADN en sitios específicos dejando los extremos de corte “cohesivos” o con capacidad para ser unidos nuevamente. Dado que la estructura del ADN es la misma en cualquier organismo, independientemente de su grado de complejidad, el hallazgo de las enzimas de restricción permitió unir entre sí fragmentos de ADN de cualquier origen. Por ejemplo, entre dos especies de plantas que no se cruzan naturalmente o entre ADN bacteriano y ADN de una especie animal. Cualquiera de estas combinaciones “por fuera” de las que ocurren en la naturaleza resultan posibles en el laboratorio.

Otro hito notable se produjo al inicio de los años 80 cuando se desarrolló la técnica de PCR (*Polymerase Chain Reaction*). A través de esta metodología, un fragmento de ADN podía ser sintetizado y amplificado en millones de copias. El descubrimiento de las enzimas de restricción y el desarrollo de la técnica de PCR marcaron el inicio de lo que se conoce como tecnología del ADN recombinante. Con estas dos herramientas, la biología molecular comenzó a desarrollar las técnicas que permitirían en el curso de unos pocos años aislar o clonar un gen, secuenciarlo, modificarlo y reintroducirlo nuevamente en una célula de cualquier organismo (Morange, 2009b). Este tipo de prácticas, conocidas universalmente como ingeniería genética, dieron lugar a la producción de los organismos transgénicos o genéticamente modificados, orientados inicialmente a la investigación científica y luego también a la producción de alimentos y remedios. La creación y el uso de estos organismos tuvo un profundo impacto en la agricultura; a la par, las características del diseño y el uso indiscriminado de estas tecnologías desencadenaron un fuerte rechazo por sus graves implicancias sobre la salud y el ambiente (Van den Belt, 2009; Pellegrini, 2013). En la última década del siglo XX surgió la Genómica como una subárea de la Genética, dedicada específicamente al estudio de la estructura y la función del genoma⁶. Los avances posteriores de otras disciplinas, como la in-

⁶ El genoma es la información genética total de un organismo. Esta información está almacenada en la molécula de ADN (o ARN en el caso de algunos virus), la cual especifica en forma de código los elementos necesarios para llevar a cabo las funciones vitales de un organismo. El genoma humano consiste de aproximadamente 3.000 millones de bases. El proyecto para su secuenciación completa fue lanzado en 1986, se inició de ma-

formática y la robótica, permitieron la secuenciación de genomas enteros, incluido el humano, dando lugar a un enfoque holístico en el estudio de los organismos vivos que se conoce como biología de sistemas. La confluencia de los conocimientos y técnicas mencionadas conforman el contexto disciplinar en el que surge, hace apenas unos 20 años, la biología sintética (Morange, 2009c; Porcar y Peretó, 2014; Cameron, Bashor Caleb y Collins, 2014; Azevedo-Rocha, 2016).

1.3. La ingeniería en la biología sintética: abstracción, modularización, estandarización

Si en términos teóricos la propuesta de la biología sintética puede sugerir una contradicción, forjada en la pretensión de extender al mundo de lo vivo el mismo grado de control que se ejerce sobre una máquina, los principios de ejecución práctica de la nueva disciplina, profundizan esta apariencia en un grado mucho mayor. Para predecir con exactitud el comportamiento de un sistema diseñado mediante biología sintética, es necesario descomponer sus partes básicas y definir de manera específica el funcionamiento de cada una de ellas. Igualmente, también es necesario definir los métodos para el ensamblaje de estas partes básicas en módulos más complejos. La biología sintética se propone aplicar los criterios del diseño racional propios de la ingeniería a los sistemas biológicos. Esto implica abordar el inmensamente complejo fenómeno de la vida con reglas y principios taxativos, hasta ahora solo aplicados en el

nera efectiva en 1990 y culminó en 2003. Aunque mayormente liderado por EEUU, el proyecto contó con la participación de varios países a través de instituciones públicas y privadas. Desde el inicio y hasta la finalización del proyecto, el desarrollo de herramientas informáticas permitió que la capacidad de almacenar información genómica de manera digital creciera unas 100 millones de veces (Hutchison III *et al.*, 2016). La publicación del genoma humano, junto con la de otros organismos, creó una enorme reserva de datos biológicos y fue uno de los cimientos para la emergencia de la biología sintética. No obstante, existe hasta el momento un gran contraste entre la enorme masa de datos generada y el conocimiento práctico o aplicación inmediata que de estos datos se han podido derivar (Morange, 2009b). Ahora bien, el proyecto genoma humano tenía un carácter biotecnológico en sí mismo y el legado inmediato de la secuenciación del genoma humano sí tuvo fuertes implicancias desde el punto de vista del avance tecnológico. La emergencia de la biología sintética no es independiente del desarrollo de la capacidad técnica y el abaratamiento de los mecanismos de secuenciación, el procesamiento de cantidades mayúsculas de información y la síntesis química de nucleótidos, las unidades elementales que conforman el ADN.

diseño y la construcción de sistemas materiales de origen artificial mediante las técnicas de la ingeniería. Estos principios son la abstracción, la estandarización y la modularización (Endy, 2005).

La *abstracción* en biología sintética refiere a la organización de la información de un sistema biológico en distintos niveles de complejidad o jerarquías. Esto permite que cada nivel sea optimizado en forma aislada e independiente de los detalles propios de los otros niveles. Aún sin perder entre sí un intercambio elemental de información, cada nivel trabaja solamente con una parte de la complejidad total de un sistema (Porcar y Peretó, 2014). Asimismo, cada nivel está incluido en un nivel superior de mayor grado de complejidad. Por ejemplo, los materiales y las funciones de un sistema biológico pueden organizarse de acuerdo a jerarquías, en grados de complejidad sucesivos: una secuencia de ADN que codifique información para un determinado gen puede ser considerado como un primer nivel de complejidad. La combinación de esa secuencia con otras, a los fines de expresar una proteína con una cierta función bioquímica establecería un segundo nivel, de mayor complejidad que el primero. A su vez, la integración de las diversas funciones de diferentes proteínas podría definir una nueva ruta metabólica, lo cual conformaría un tercer nivel de jerarquía, de mayor complejidad que los dos anteriores. Y así sucesivamente, cada jerarquía o nivel de abstracción implica solo una fracción de la complejidad total del sistema a diseñar (Endy, 2005). El objetivo de la abstracción es que cada nivel sea manipulado y optimizado como un bloque o unidad elemental, de manera independiente del contexto biológico circundante. Cada uno de estos bloques, también denominados componentes básicos o partes biológicas, pueden ser montados o combinados con otros bloques, de manera de construir estructuras más complejas por la simple unión de bloques individuales. De alguna manera, las experiencias básicas de la ingeniería genética llevan a cabo esta práctica de abstracción. Al clonar un gen de un determinado organismo para luego introducirlo en otro organismo, el gen es abstraído de su contexto genético natural e introducido en un contexto diferente.

En el Capítulo III de este trabajo veremos que en el marco de la teoría crítica de la tecnología, este proceso de abstracción y descontextualización de los objetos naturales excede a las prácticas particulares de la ingeniería o la biología sintética. Más bien representa una visión o forma de vincularse con el mundo, una manera elemental de mirar los objetos

que nos rodean en términos de estricta utilidad o aplicación práctica (Feenberg, 1999; Feenberg, 2008). Al comienzo de su trayectoria tecnológica, cualquier objeto natural que va a ser luego parte de un artefacto se revela como tal a través de este proceso o visión del mundo. Para la biología sintética los sistemas vivientes, aún con su inmensa complejidad intrínseca, no constituyen una excepción a esta perspectiva.

La *estandarización* define, describe y caracteriza cuantitativamente los diferentes partes o componentes básicos de los sistemas biológicos (Endy, 2005). Estas partes biológicas son construidas en base a requerimientos específicos de rendimiento y función. Las diferentes partes son reconocidas para un uso específico y pueden ser intercambiables con otras partes ortogonales, es decir, equivalentes desde el punto de vista funcional. Aunque el desarrollo de la estandarización en biología sintética es considerablemente menor, en comparación con otras áreas de la ingeniería, existen varios catálogos de partes y protocolos que garantizan la reproducibilidad de las técnicas utilizadas (Canton, Labno, Endy, 2008; Decoene *et al.*, 2018). La Fundación iGEM (*International Genetically Engineered Machine*) tiene un registro de más de 20.000 partes biológicas estándar, denominadas “ladrillos biológicos” o *biobricks*⁷. Las partes están ordenadas en un catálogo, distribuidas en varias colecciones genéticas, y caracterizadas individualmente por su estructura y función (iGEM, 2021). Este registro común alienta la combinación de partes biológicas de distintas fuentes, facilitando su acoplamiento funcional. Cada parte cuenta con un prospecto o *datasheet* que detalla los datos de sus componentes y las condiciones de su funcionamiento, similar a los utilizados para cualquier artefacto o máquina construido mediante las técnicas tradicionales de la ingeniería (Endy, 2005; Canton *et al.*, 2008).

La *modularización* es un concepto complementario al de abstracción: resulta más sencillo abordar la construcción de una parte componente de un sistema de manera separada, concebida como un problema independiente respecto del sistema general al cual está integrada. La

⁷ El sitio en internet de la Fundación *The International Genetically Engineered Machine* (iGEM) declara que es una “organización independiente sin fines de lucro, dedicada al avance de la educación y la competición y al desarrollo de una comunidad abierta y colaborativa” (<https://igem.org/About>). Una de las principales actividades de la iGEM es una competencia anual de estudiantes de todo el mundo donde pueden ser presentados nuevos diseños y objetos de biología sintética, construidos a partir de los *biobricks* registrados en el catálogo.

combinación de diferentes partes biológicas crea módulos funcionales, los cuales pueden ser utilizados en una diversidad de contextos biológicos. Una determinada vía metabólica tendrá una estructura verdaderamente modular si sus diferentes partes pueden desensamblarse, intercambiarse con otras partes o módulos ortogonales y luego volver a ensamblarse, sin que esto altere su función original (Lam *et al.*, 2009). Este concepto es central en ingeniería y en el diseño y la construcción de máquinas, donde el intercambio de diferentes bloques o módulos no debería alterar el funcionamiento general de un sistema. Su verdadero alcance en biología sintética es todavía materia de discusión, ya que la complejidad de las interacciones biológicas introducen una incertidumbre natural y constitutiva en los sistemas vivientes. En el Capítulo II de este trabajo volveremos sobre este punto para analizar con mayor grado de detalle las tensiones que se generan al intentar asimilar el comportamiento de un sistema biológico con el de un sistema artificial.

La síntesis de butanol, un compuesto potencialmente capaz de sustituir a la nafta como combustible para el transporte, es útil como un ejemplo sencillo de aplicación de los principios de la ingeniería en los organismos vivos (Savage, Way y Silver, 2008). El butanol es un alcohol orgánico producido naturalmente en bacterias del género *Clostridium*. La ruta de síntesis de este compuesto involucra a seis genes que contienen la información para generar otras tantas enzimas. Con el objetivo de producir butanol como biocombustible, cada uno de estos genes fue clonado e introducido en la bacteria *Escherichia coli*, un organismo modelo que no produce naturalmente butanol, pero que al estar mucho más estudiado que *Clostridium*, constituye un sistema más adecuado para su producción (Atsumi *et al.*, 2008). La bacteria *Escherichia coli* no solo ofició como chasis o receptor de los genes de la vía del butanol, sino que también fue modificada a su vez, de manera de: a) maximizar la actividad de las enzimas expresadas por los genes foráneos provenientes de *Clostridium*; y b) suprimir la actividad de algunas enzimas propias; esto es, expresadas por genes nativos de *Escherichia coli*, cuya actividad podría conducir a una disminución de la cantidad de butanol producida. Los pasos descritos (clonado de genes del organismo dador, transferencia de estos a un organismo receptor, modificaciones para lograr un aumento y/o disminución de la expresión de genes y de sus productos) son sistematizados mediante parámetros cuantitativos que definen las condiciones estándar para lograr una cantidad definida de butanol

en el “nuevo organismo” (la bacteria *Escherichia coli* modificada). Conceptualmente, el experimento descrito consistió en la extracción de los genes de su contexto natural (abstracción); fusión de estos genes con otras secuencias de ADN para construir módulos, denominados vectores o plásmidos (modularización); e introducción de dichos plásmidos en otra bacteria, cuyo funcionamiento es parametrizado de manera específica para optimizar la producción industrial de butanol (estandarización).

1.4. Las producciones de la biología sintética

En este apartado examinaremos una serie de producciones paradigmáticas que han contribuido a instalar a la biología sintética como un área tecnológica potencialmente capaz de dar respuesta a importantes demandas en materia de salud, ambiente y alimentación. Los diseños desarrollados por la biología sintética se agrupan en tres categorías básicas, dentro de las cuales se incluyen algunas variantes (O’Malley, Powell, Davies y Calvert, 2007; Lam *et al.*, 2009; Mackenzie, 2010). Estas tres categorías son las siguientes:

- construcción de circuitos con piezas estándar de ADN o *biobricks*.
- modificación de rutas metabólicas.
- síntesis de un genoma mínimo.

1.4.1. Construcción de circuitos con piezas estándar de ADN (*biobricks*)

Este tipo de construcciones fue característico de los inicios de la biología sintética. Consiste en el ensamble sencillo de moléculas de ADN con distintas funciones que luego son introducidas en distintos tipos de células hospedantes, generalmente bacterias o levaduras modelo, cuya biología general es bien conocida. Las construcciones de este tipo han sido llamadas circuitos genéticos y tienen una lógica de funcionamiento similar a la de los circuitos básicos desarrollados en electrónica (Lam *et al.*, 2009). Un ejemplo clásico es el *toggle switch* o interruptor biológico, uno de los primeros circuitos celulares fabricados, el cual consiste en la síntesis de dos proteínas represoras que se inhiben mutuamente (Gardner, Cantor y Collins, 2000). Al exponer la célula hospedante a un estímulo externo (por ejemplo, calor o una sustancia específica) una de las proteínas resulta inactivada y la otra puede entonces acumularse y

producir un efecto determinado. Más allá de los detalles, lo que interesa conceptualmente desde la perspectiva de la biología sintética en este dispositivo sencillo es: a) la construcción de módulos con una función establecida, b) la introducción de estos módulos en un chasis celular, y c) la respuesta del sistema ante el estímulo u orden impartida. En definitiva, lo notable es la capacidad de control que se puede ejercer sobre un sistema biológico diseñado artificialmente para el cumplimiento de una determinada función. Muchos circuitos de gran complejidad y precisión fueron construidos con posterioridad al descrito (Cameron *et al.*, 2014): cultivos bacterianos capaces de distinguir ciertas operaciones numéricas, bacterias con capacidad para registrar y procesar imágenes, sensores de compuestos tóxicos, entre otros (O'Malley *et al.*, 2007; Lam *et al.*, 2009; Qian, McBride y Del Vecchio, 2018). Los módulos así construidos son registrados en el catálogo abierto del iGEM y se encuentran disponibles para su eventual acople en otros sistemas biológicos.

1.4.2. Modificación de rutas metabólicas

Tal vez la aplicación más relevante que ha logrado concretar la biología sintética ha sido la fabricación de terpenoides, compuestos naturalmente producidos en plantas y microorganismos, utilizados mayoritariamente en la industria farmacológica y también en la industria de alimentos y en cosmética (Paddon y Keasling, 2014). Uno de los terpenoides más relevantes es la artemisinina, fármaco empleado para combatir la malaria. Usualmente este compuesto es extraído de plantas como *Artemisia annua* o bien es producido en el laboratorio de manera artificial mediante síntesis química; sin embargo, ambos métodos tienen altos costos y muy bajo rendimiento. El laboratorio de Jay Keasling en Davies, California, empleó dos estrategias diferentes que combinan la ingeniería metabólica y la biología sintética para la producción artificial de artemisinina en microorganismos. Una de estas estrategias consistió en introducir en la bacteria *Escherichia coli* la ruta completa de síntesis de artemisinina de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, codificada por ocho genes (Martin *et al.*, 2003). La otra estrategia, se desarrolló en dos pasos: a) regular la expresión de varios genes en la propia levadura *Saccharomyces cerevisiae*, de manera de aumentar la producción de farnesilpírofosfato, uno de los compuestos precursores de artemisinina, y b) introducir en la levadura dos genes adicionales de la planta *Artemisia annua*, para

aumentar aún más la síntesis de artemisinina a partir de farnesilpirofosfato. En simultáneo con el aumento de la expresión de varios genes de la ruta de síntesis de artemisinina y de la introducción de genes foráneos provenientes de la planta, la expresión de otro gen nativo de la levadura fue reducida. De esta manera se logró disminuir el consumo endógeno, es decir, por parte de la misma levadura, de la artemisinina (Ro *et al.*, 2006). La artemisinina producida de esta manera es transportada hacia el exterior de la célula de la levadura, facilitando el proceso industrial posterior de extracción y purificación. La combinación de todas las modificaciones mencionadas en levadura condujo a una producción de artemisinina 500 veces mayor respecto a cualquier otra estrategia de obtención reportada hasta entonces. Más aún, considerando que muchos terpenoides utilizan el mismo precursor general (farnesilpirofosfato) para su síntesis, la levadura modificada es considerada como una plataforma para la obtención de una diversa variedad de terpenoides, además de la artemisinina, con diferentes aplicaciones (Peralta-Yahya *et al.*, 2012)⁸.

La modificación de las rutas metabólicas de organismos vivientes con el objetivo de diseñar una fuente renovable para la producción de energía es uno de los principales objetivos que se ha propuesto el campo de la biología sintética (Savage *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2012; Porcar y Peretó, 2014). Los biocombustibles son diferentes formas de energía obtenidas a partir de material biológico que representan una alternativa para el reemplazo de los combustibles fósiles, cuya reserva es finita y se encuentra ya en una fase de agotamiento (Wenz, 2009). En la actualidad, la principal materia prima para la obtención de biocombustibles es el cultivo de plantas ricas en carbohidratos y en grasas y aceites, sustratos para la fabricación de bioetanol y biodiésel, respectivamente. El bioetanol y el biodiésel son potenciales sucedáneos de la gasolina (nafta) y el diésel, los principales combustibles convencionales que se utilizan en los sistemas de transporte a escala global.

La producción de biocombustibles a partir de cultivos tradicionales de plantas ha desencadenado una serie de conflictos graves de naturaleza

⁸ Una plataforma tecnológica es un soporte que permite el desarrollo de una diversidad de productos relacionados. De acuerdo a Mackenzie (2010), la estandarización de partes biológicas (*biobricks*) que caracteriza a la biología sintética abre la posibilidad de conformar un “espacio de diseño” o plataforma para el desarrollo de un amplio rango de aplicaciones. La levadura modificada para la producción de artemisinina se emplea como plataforma para la generación de productos de cosmética, biocombustibles y alimentos nutraceuticos, entre otros (Thompson, 2012a).

ambiental, económica y social. Aún así, esta modalidad de producción continúa siendo el procedimiento más utilizado en la actualidad como alternativa al uso de combustibles fósiles. La justificación general de los grandes grupos que dominan la producción de biocombustibles para persistir con el diseño tecnológico vigente es su mayor eficiencia económica respecto a otros diseños alternativos (Schmidt *et al.*, 2012; Debnath, 2019). La problemática puntual de la producción de biocombustibles a partir de plantas será examinada en detalle en el Capítulo IV de este trabajo. Por el momento solo apuntaremos que estos conflictos han colocado el foco sobre la biología sintética como posible vía de solución para la producción de energía a partir de materiales biológicos, principalmente a partir de microorganismos (Zargar *et al.*, 2017) y también, aunque aún con perspectivas aún lejanas de concreción, a partir de plantas (Shih, 2018).

1.4.3. Síntesis de un genoma mínimo

Uno de los logros más impactantes de la biología sintética, y sin duda el que alcanzó mayor repercusión mediática, fue la construcción artificial del genoma completo de un organismo y la demostración de su funcionalidad. El término artificial en este caso se refiere a que el genoma fue enteramente construido en el laboratorio desde sus unidades más sencillas; esto es, a partir de los nucleótidos o moléculas estructurales básicas del ADN. Se trata de una serie de experimentos de gran complejidad realizados bajo la dirección de Craig Venter que en buena medida han trascendido el ámbito específico de la comunidad científica⁹. El proyecto se inició hace varios años y su objetivo último, aún no concretado, es la construcción de una célula artificial fabricada íntegramente en un laboratorio. Para la construcción de un genoma completo se utilizaron micoplasmas, organismos bacterianos que consisten de una única célula

⁹ John Craig Venter saltó a la fama durante el transcurso del Proyecto Genoma Humano al desarrollar en su empresa, Celera Genomics, una estrategia diferente de secuenciación del genoma respecto de la ejecutada por el consorcio que hasta entonces llevaba adelante el proyecto público. La estrategia de Venter, consistente en la secuenciación aleatoria de fragmentos pequeños de ADN y el uso de supercomputadoras, resultó ser más rápida y eficiente (Morange, 2009b). Luego de dos años de controversias, finalmente el proyecto público y el privado de Venter comenzaron a trabajar en colaboración y el trabajo fue culminado en 2003. Actualmente Venter dirige, entre otras empresas, un instituto de investigación propio, el *John Craig Venter Institute* en California.

y que contienen un genoma muy pequeño. En un primer grupo de experimentos se logró el trasplante del genoma natural de una de estas bacterias, *Mycoplasma mycoides*, a otra bacteria, *Mycoplasma capricolum*, la cual previamente había sido desprovista de su propio genoma (Lartigue *et al.*, 2007; Lartigue *et al.*, 2009). El resultado de este experimento reveló que la bacteria *Mycoplasma capricolum*, que hizo las veces de recipiente del genoma, “cambió de identidad”. Mediante varios criterios de prueba, el genotipo y el fenotipo de la bacteria receptora, y también el de su descendencia, resultó ser idéntico al de la bacteria donante del genoma. A su vez, las bacterias receptoras no contenían ningún rastro de su genoma original. En síntesis, se produjo una transformación total de una especie bacteriana en otra especie bacteriana diferente. Potencialmente, la célula receptora podría ser usada entonces como plataforma para albergar cualquier tipo de genoma, natural o sintético. Es interesante volver sobre la fundamentación de los autores acerca de los motivos prácticos que los llevaron a concretar este tipo de experimentos. Estos conceptos reflejan las grandes expectativas formuladas alrededor de la biología sintética.

El trasplante de genomas es un requerimiento para consolidar el área de la genómica sintética. Esto puede facilitar la construcción de organismos apropiados para resolver los problemas sociales más acuciantes en la producción de energía, el cuidado del ambiente y la salud (Lartigue *et al.*, 2007: 632).

En un siguiente experimento, el ADN de la bacteria *Mycoplasma genitalium*, compuesto por algo menos de 600.000 pares de bases nucleotídicas, fue reconstruido mediante síntesis química, a partir de la información de su secuencia almacenada en forma digital. La copia del genoma se materializó en una multitud de fragmentos que en una primera etapa fueron clonados en la bacteria *Escherichia coli*. En una segunda etapa se utilizó otro organismo, la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, para ensamblar todos los fragmentos en el orden correcto, formando así un cromosoma genuinamente sintético. El resultado constituyó el primer reporte de la síntesis química de un genoma artificial completo (Gibson *et al.*, 2008). El genoma sintético constaba exactamente de 582.970 pares de bases y contenía todos los genes naturales del organismo excepto uno, el gen MG408, el cual fue inactivado para neutralizar la patogenicidad de la bacteria y también para facilitar la iden-

tificación de las colonias sintéticas respecto de las naturales. Al momento de la publicación del trabajo, *Mycoplasma genitalium* era el organismo natural con el menor número de genes conocido (Gibson *et al.*, 2010).

Posteriormente, el equipo de Venter condensó los logros anteriores y avanzó un escalón adicional hacia la construcción de una célula sintética. Los autores se propusieron reconstruir artificialmente una célula entera a partir de la información digital de su ADN. De hecho, Venter caracterizó los resultados como la “creación” de una célula bacteriana controlada por un genoma sintético, y sostuvo que se trataba del primer organismo viviente “descendiente de una computadora” (Porcar y Peretó, 2014: 47). El primer paso consistió en sintetizar en forma artificial el genoma de la bacteria *Mycoplasma mycoides*, de aproximadamente 1.1 millones de pares de bases. Se eligió a este organismo, en vez de *Mycoplasma genitalium*, porque su crecimiento en el laboratorio es mucho más rápido¹⁰. Luego de reconstruirlo en el orden correcto en una célula de levadura, el segundo paso consistió en trasplantar el genoma artificial a un “chasis”, una célula de *Mycoplasma capricolum* desprovista de su propio genoma. La diferencia con respecto a los experimentos previos de Lartigue *et al.* (2007) y Lartigue *et al.* (2009) es que en este caso el ADN del genoma transferido era completamente sintético (Gibson *et al.*, 2010). El nuevo organismo artificial, denominado *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 resultó capaz de mantenerse y reproducirse por sí mismo, exhibiendo propiedades indistinguibles de la cepa natural *Mycoplasma mycoides*¹¹.

El término “creación” de una célula artificial empleado por Venter recibió fuertes críticas de una parte de la comunidad científica, ya que en rigor la célula receptora era de origen natural. La estrategia de construcción en este caso fue de tipo *top-down*, es decir, se construyó un organismo artificial tomando como punto de partida una célula natural que ofició de recipiente. Con los conocimientos actuales en biología, una estrategia diferente del tipo *bottom-down* para la creación de una

¹⁰ Los autores incluyeron en la secuencia fabricada cuatro fragmentos de 1000-1200 pares de bases a la manera de marcas de agua, para diferenciar así el genoma sintético del natural y también para dejar asentada su autoría.

¹¹ JCVI-syn1.0 contiene las iniciales de John Craig Venter Institute y el prefijo syn (del inglés *synthetic*) que hace referencia a su carácter sintético. El organismo fue también denominado informalmente *Mycoplasma laboratorium* o “Synthia”, en referencia a su origen artificial y sintético.

célula enteramente sintética o “desde cero”, todavía se encuentra en un horizonte muy lejano de concreción (Porcar y Peretó, 2014; Azevedo-Rocha, 2016). Los autores del trabajo argumentan que si bien la célula creada no es completamente sintética, las divisiones celulares y el recambio molecular propio de la actividad metabólica normal, diluyen progresivamente los componentes naturales de la célula que oficia de recipiente. Luego de 30 divisiones celulares, lo cual en este tipo de micoplasmas toma un tiempo de algo más de 24 horas, las moléculas originales de la célula recipiente son completamente reemplazadas por moléculas nuevas, sintetizadas en base a la información contenida en el genoma sintético (Gibson *et al.*, 2010; Hutchison III *et al.*, 2016). En síntesis, al comenzar el experimento el organismo se encontraba reducido a su información genómica almacenada en forma digital. Al finalizar el experimento, el organismo había sido reconstruido en forma secuencial hasta ser completamente materializado en una célula que era, según la óptica de los autores, artificial. Para reforzar su punto de vista, los autores definen al genoma como un software capaz de crear su propio hardware. Y agregan: “Se espera que las propiedades controladas por el genoma reconstituido en la célula natural sean las mismas propiedades que las que hubiese exhibido en una célula producida de manera sintética” (Gibson *et al.*, 2010: 56).

Finalmente, mencionaremos otro experimento realizado en el mismo laboratorio cuyo objetivo fue la síntesis de un genoma mínimo; esto es, un genoma que contuviera únicamente aquellos genes que resultan esenciales para la vida, al menos en las condiciones ideales existentes en el laboratorio. Los reportes previos estimaban un número mínimo de entre 200 y 250 genes necesarios para la vida de una célula (Porcar y Peretó, 2014; Hutchison III *et al.*, 2016). El genoma de casi todos los organismos exhibe cierto grado de redundancia en las funciones que codifica, de manera tal que la pérdida de un determinado gen no significa necesariamente la pérdida de la función que ese gen expresa. En la trayectoria evolutiva de las células más sencillas, como es el caso de los micoplasmas, es frecuente la pérdida de muchas copias de genes redundantes o que no resultan esenciales. Al ser parásitos del intestino de mamíferos, los micoplasmas han encontrado un ambiente “cómodo”, con abundancia de los materiales necesarios para desarrollar su programa vital. Por este motivo, los micoplasmas son ideales para llevar a cabo el proyecto de establecer el genoma mínimo de un organismo. Para este

experimento se ensayó el efecto sobre el crecimiento de cada uno de los 901 genes contenidos en la secuencia de 1.079.000 pares de nucleótidos de *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 (Hutchison III *et al.*, 2016). Aquellos genes cuya presencia no resultaba indispensable para el crecimiento y la viabilidad del organismo se consideraron no esenciales y fueron eliminados del genoma. El resultado fue un nuevo organismo, denominado *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn3.0, con solo 531.000 pares de nucleótidos y 473 genes, que representaban el 49% y el 52% respectivamente, del genoma de su antecesor inmediato *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0. Algunos de estos genes resultaron esenciales para la viabilidad del organismo; otros genes fueron considerados cuasi esenciales, ya que sin llegar a afectar la viabilidad, sí resultaron indispensables para un crecimiento considerado normal. Hasta el momento, el tamaño de este genoma reducido a su mínima expresión, es menor que el de cualquier célula de origen natural capaz de replicarse de manera autónoma¹². Es además importante aclarar que el organismo sintético portador del genoma mínimo contiene 149 genes esenciales cuya función biológica es aún desconocida (Hutchison III *et al.*, 2016).

Estos experimentos representan un avance muy importante en la identificación de los componentes moleculares mínimos para el sostén de la vida. A la par, abren un camino para el diseño de genomas artificiales no creados previamente de manera natural. Dado que *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn3.0 contiene solo los genes considerados esenciales, los autores proponen a esta bacteria como un organismo ideal para el estudio de las funciones básicas que sostienen el fenómeno de la vida y que aún resultan desconocidas.

Sin embargo, el organismo “creado” podría estar aún lejos de los objetivos postulados por los mentores de la biología sintética, respecto al diseño y la creación de nuevas entidades vivientes. Tal vez sería más preciso sostener que, antes que la creación de un organismo, se ha logrado reproducir de manera artificial un genoma natural. Y también se

¹² Las bacterias modelo que han sido mejor estudiadas, como *Bacillus subtilis* y *Escherichia coli*, contienen entre 4000-5000 genes. Aunque muchos de ellos solo son indispensables en contextos muy específicos de crecimiento, esta reserva general de genes permite a los organismos una mayor flexibilidad para adaptarse a vivir en una diversidad de condiciones. El número de genes considerados esenciales dependerán en última instancia de las condiciones del ambiente. A medida que estas se vuelven menos permisivas, aumenta el número de genes esenciales (Hutchison III *et al.*, 2016).

ha logrado que la copia construida resulte indistinta del organismo natural desde el punto de vista funcional. Pero más allá del extraordinario avance técnico que implica el diseño y la fabricación de los organismos JCVI-syn1.0 y JCVI-syn3.0, no es posible aún prescindir del chasis o recipiente original, esto es, de una célula natural para albergar el genoma sintético. La biología sintética no ha logrado todavía producir una célula enteramente sintética, ni parece aún estar cerca de cumplir ese objetivo (Thompson, 2012a; Porcar y Peretó, 2014).

Por otro lado, en términos de aplicaciones prácticas, se propone a *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn3.0 como potencial chasis o plataforma productiva a la cual se podría adicionar cualquier *biobrick* o módulo biológico que exprese una función útil desde el punto de vista biotecnológico. Por ejemplo una ruta metabólica con los componentes moleculares necesarios para la biosíntesis de un nuevo tipo de combustible (Hutchison III *et al.*, 2016). Esto se analizará con más detalle en el Capítulo IV de este trabajo.

1.5. La biología sintética y la divisoria entre natural y artificial

En la última parte de este capítulo, introduciremos un debate filosófico que luego será desarrollado con mayor grado de detalle en el Capítulo II. La biología sintética ha venido a reflotar con fuerza la discusión en torno al límite que establece las diferencias entre las entidades naturales y las entidades artificiales, es decir lo que llamamos artefactos. Para algunos autores, el grado de intervención potencial que supone la biología sintética sobre los organismos vivos es tan profundo y radical, que si lográramos diseñar y construir sistemas biológicos siguiendo los mismos procedimientos empleados para la producción de artefactos, se arribaría finalmente a la imposibilidad de trazar una distinción ontológica significativa entre lo que se concibe como natural y lo que se concibe como artificial.

Por ejemplo, Lynne Baker (2008) afirma que la esencia de un artefacto reside en la función que le ha sido asignada, el propósito para el cual fue creado. Por esta razón, la autora sostiene que el criterio demarcatorio apropiado para diferenciar entre las entidades naturales y los artefactos debería estar basado en la intención humana. Los artefactos son dependientes de la intención para su existencia; en cambio, los objetos naturales son aquellos cuya existencia transcurre de manera indepen-

diente de las intenciones y las prácticas humanas. Bajo este criterio, una máquina es un artefacto porque sus componentes y su funcionamiento se originan en la voluntad y los propósitos humanos. Un animal salvaje, en cambio, es un ejemplo de un objeto natural, ya que su modo de existencia transcurre de manera independiente, sin que para ello sea necesario ningún tipo de agencia humana. Una vez establecida esta distinción, la misma autora se cuestiona acerca del alcance y la vigencia actual de este criterio demarcatorio. Baker sostiene que, si bien la división entre naturaleza y arteificio comenzó a hacerse cada vez más opaca con el avance del conocimiento científico y tecnológico, las producciones de la biotecnología moderna, y en particular la biología sintética, implicarían una suerte de “catástrofe” o ruptura ontológica porque contribuyen a disolver en forma radical los límites entre artefactos y organismos naturales. Como ejemplos de objetos ambiguos que desafían o disuelven esos límites Baker cita, entre otros, programas de computadoras que actúan como “organismos digitales” (ya que pueden mutar y reproducirse); bacterias que funcionan produciendo energía a partir de su actividad metabólica; ratas-robot que obedecen órdenes a través de un electrodo implantado en su cerebro o virus modificados genéticamente para atacar en forma selectiva a células cancerosas (Baker, 2008). Christopher Preston esgrime un argumento similar al de Baker, cuando sostiene que la biología sintética tiende a reemplazar a la naturaleza y amenaza el propio concepto de lo que entendemos por natural (C. Preston, 2008). Para este autor, aún las técnicas moleculares más sofisticadas de la biotecnología, como sería el caso de la ingeniería genética, no alteran en forma significativa el genoma de los organismos. Tampoco modifican su historia evolutiva, en la medida que la inmensa mayoría de los genes de un organismo modificado genéticamente permanecen inalterados. En cambio, con su objetivo expreso de crear nuevas formas de vida, la biología sintética sería el ejemplo paradigmático de la creciente indistinción entre organismos naturales y artefactos. Para C. Preston la posibilidad de diseñar y fabricar un organismo en el laboratorio implicaría, al igual que en los ejemplos que detalla Baker, que la vida no es algo estrictamente reservado a la naturaleza ni necesariamente independiente de la intencionalidad humana (C. Preston, 2008; Thompson, 2012a).

En respuesta a la argumentación de Baker y C. Preston, Beth Preston (2008) sostiene un argumento que hemos mencionado en las páginas precedentes y que será examinado en detalle en el Capítulo II de

este trabajo: en rigor, la modificación de organismos por la agencia humana se ha manifestado desde el comienzo mismo de la historia humana. Por lo tanto, para esta autora el grado de intervención que reflejan los avances tecnológicos más recientes, tiene un significado mucho más relativo y alejado del “catastrofismo” que le asignan Baker y C. Preston. La línea que separa artefactos de objetos naturales no solo es difusa actualmente, sino que lo ha sido desde el comienzo mismo de la civilización humana. Preston (2013) sostiene que el cruce entre lo natural y lo artificial empezó en realidad hace más de 10.000 años, a través de los procesos de domesticación de plantas y animales:

la biología sintética no cruza ninguna línea ontológica que no fuera cruzada ya en el Neolítico... Todo lo demás, incluyendo la ciencia moderna y la tecnología –y en particular la biotecnología– es nada más que una serie de notas al pie a partir de la transición en el Neolítico de la recolección de alimentos a la agricultura (p. 650).

Desde el inicio mismo de su interacción con plantas y animales, y con el objetivo de garantizar su supervivencia, el ser humano introduce un sesgo en lo que de otra manera hubiera sido una trayectoria evolutiva natural de los organismos. Los organismos bajo domesticación dejan de reproducirse de manera azarosa y lo hacen, en cambio, bajo cierto grado de control del agente humano. De acuerdo a Preston, son entonces esta clase de bioartefactos, originados con el nacimiento de la ganadería y la agricultura, los que marcan el verdadero punto de inflexión que comienza a desdibujar el límite entre lo natural y lo artificial. Los avances biotecnológicos más recientes, serían tan solo ejemplos contemporáneos y altamente sofisticados de prácticas cuyo origen es ancestral (B. Preston, 2008; B. Preston, 2013).

A manera de resumen, en este capítulo hemos descripto y analizado los conceptos fundamentales que definen a la biología sintética como el último y tal vez el más acabado exponente de la biotecnología molecular. Hemos examinado las bases que cimentaron la emergencia de la biología sintética y analizado la clase de objetos que ha comenzado a diseñar y construir. También hemos hecho una reconstrucción de los ejes fundamentales de un debate actual acerca de la línea divisoria entre las entidades naturales y artificiales, a la luz de las producciones que la biología sintética sería capaz de generar. De acuerdo al discurso de sus principales promotores, la nueva disciplina se funda en una concepción

de los organismos vivientes que los coloca en un lugar próximo al de las máquinas; esto es, como entidades susceptibles de ser diseñadas y controladas de manera estricta por un agente humano para extraer de ellas una cierta utilidad. La biología sintética es tributaria de la ingeniería y la biología y se reserva para sí un carácter eminentemente tecnológico, en el cual se vislumbra una suerte de conjunción del mundo natural con el artificial. Tecnología, ingeniería y diseño son conceptos propios del mundo artificial que la biología sintética proyecta al universo de los organismos vivos, entidades cuyo origen se asienta en el mundo natural. Esto confiere a los objetos producidos por biología sintética una naturaleza singular cuyo significado ontológico será examinado en detalle en el capítulo siguiente.

Capítulo II. Biología sintética es tecnología: artefactos y organismos

2.1. La biología sintética y la tecnología

Como se mencionó en el Capítulo I, varios autores han afirmado el predominio de un carácter tecnológico antes que epistémico en la biología sintética (Keller, 2009; Thompson, 2012a; Mackenzie, 2013; Preston, 2013; Porcar y Peretó, 2014). La nueva disciplina no se ocuparía tanto de la generación de nuevos conocimientos teóricos sobre la estructura y la función de los genomas, como de una forma particular de concebir y ejecutar las prácticas biotecnológicas, las cuales por definición están orientadas hacia objetivos eminentemente prácticos. El aspecto esencialmente novedoso de la biología sintética consistiría en el diseño y la construcción de organismos biológicos mediante la aplicación de principios de la ingeniería. Esto traería aparejado un grado de control sobre la materia viviente que no registra antecedentes en las técnicas en biotecnología empleadas hasta el momento.

Los conceptos de tecnología, ingeniería y diseño parecen formar parte de los fundamentos mismos de la biología sintética (Endy, 2005). En las secciones siguientes de este capítulo revisaremos estos conceptos medulares que van a presentarse de manera recurrente a lo largo este trabajo. Son conceptos que no responden a una definición unívoca; nos aproximaremos a ellos de manera general analizando sus fundamentos básicos para luego volver a revisarlos en el Capítulo III desde la perspectiva de la teoría crítica de la tecnología de Andrew Feenberg. En el Capítulo IV, volveremos a reexaminarlos en el marco de una aplicación específica de la biología sintética: el diseño y la producción de biocombustibles.

Primeramente, abordaremos una cuestión que ya hemos apuntado como paradójal. La ingeniería es una práctica asociada con el diseño, la

construcción y el control del funcionamiento de los sistemas y objetos técnicos; aquello que a priori podemos caracterizar como parte del mundo artificial (Simon, 1996). Sin embargo, la biología sintética trabaja con materiales biológicos y organismos vivos, entidades que forman parte de lo que conocemos como el mundo natural. Esta presunta contradicción nos lleva a preguntarnos en qué categoría ontológica están incluidos los organismos modificados o creados mediante la aplicación de las técnicas de biología sintética. ¿Se trata de objetos naturales o artificiales? ¿O bien están conformados por una naturaleza ambigua que conduciría a colocarlos bajo alguna categoría de objetos híbridos? ¿Son enteramente novedosos o más bien se incorporan a una suerte de camino ya trazado por la agencia humana en el mundo de los organismos vivos? ¿Hasta dónde es posible extender el control sobre la materia viva para predecir de manera precisa su comportamiento? ¿Se puede asimilar el funcionamiento de un organismo vivo con el de una máquina? Intentaremos responder a estos interrogantes abordando en primer lugar una indagación de tipo ontológica, que permita comprender los componentes esenciales que describen la naturaleza de los objetos técnicos. Luego extenderemos ese análisis al caso particular de los sistemas biológicos y organismos intervenidos por la agencia humana, incluyendo las producciones de la biología sintética.

2.1.1. *Tecnología*

Los términos *tecnología* y *técnica* suelen utilizarse de manera indistinta aunque tienen significados diferentes. En términos generales, *tecnología* se refiere a una ciencia que abarca el estudio sistemático y la indagación acerca de las artes materiales. *Técnica* apunta en cambio a la forma particular y a los métodos específicos para desarrollar esas actividades. Mitcham y Schatzberg (2009) sostienen que no existe un significado puro o inequívoco de *tecnología* sino que el término es continuamente reinventado y va adquiriendo distintos sentidos y múltiples adaptaciones de acuerdo a diferentes épocas y comunidades de expertos que lo definen. A partir del siglo XIX, las tres comunidades académicas que adoptan una perspectiva propia sobre el término son las ciencias naturales y la ingeniería, las ciencias sociales y las humanidades.

La *Tecnología* como campo de indagación filosófica es un área de estudios muy joven comparada con otras disciplinas, como la *Biología*

o la Física, que cuentan con una tradición mucho más extensa en este terreno. Hasta hace pocas décadas, los filósofos no demostraban mayor interés en la filosofía de la tecnología. La creencia de que se trataba de una mera extensión de la ciencia al ámbito de las aplicaciones prácticas era una de las principales razones por las cuales la tecnología no se consideraba como un campo disciplinar independiente, con complejidad suficiente para la atención filosófica (Mitcham, 1989; Feenberg, 2002; Kroes y Meijers, 2006). Si bien la tecnología comienza a ser objeto de indagación filosófica desde hace más de dos siglos, es recién a mediados del siglo XX cuando se define como un campo epistémico formal y adquiere un progresivo arraigo en los ámbitos académico e institucional (Mitcham, 1989).

La definición original del objeto de estudio de la Tecnología se constituye sobre dos categorías tradicionales que conforman el núcleo de la reflexión filosófica sobre la tecnología; a) las acciones técnicas y b) los objetos artificiales que construye la técnica. Existen a su vez, dos tradiciones diferentes para abordar el estudio de cada una de estas categorías: el enfoque realista y el enfoque antropométrico. Ambos enfoques procuran definir una suerte de teoría general de la tecnología, aplicada tanto a las acciones como a los objetos técnicos, pero basada en premisas diferentes que se distinguen de acuerdo a que consideran como el componente fundamental de la tecnología (Sandrone, 2017). Por un lado, el llamado realismo tecnológico estudia la estructura y el funcionamiento de los objetos y las acciones técnicas desde la perspectiva de las leyes naturales que rigen el comportamiento de la materia. En esta visión, el componente humano de los procesos técnicos, sea individual o colectivo ocupa un lugar secundario. Por otro lado, la visión antropométrica conforma un enfoque de la tecnología centrado en los aspectos corporales y cognitivos del agente humano, antes que en los principios naturales que rigen el comportamiento de objetos y mecanismos técnicos¹.

¹ La tecnología general que concibe el enfoque realista contempla una teoría de las acciones técnicas y una teoría de los objetos técnicos. Ambas intentan establecer una serie axiomática de entidades elementales, acciones y objetos técnicos, que al estar fundada en los principios objetivos del conocimiento científico asumirían un carácter universal. En el primer caso, las acciones técnicas esenciales se llevan a cabo independientemente de los medios instrumentales, sean estos naturales o artificiales, que se empleen en los diferentes procesos y contextos técnicos. Por su parte, la teoría de los objetos técnicos contempla el estudio de las configuraciones materiales y los mecanismos de funcionamiento de los artefactos considerados esenciales, una suerte de colección de “artefactos madre” a partir de los cuales se derivarían otros artefactos, usados en forma contingente

Por su parte Carl Mitcham (1989) distingue dos tradiciones diferentes en cuanto el abordaje filosófico de la tecnología. Una de ellas, la filosofía de la tecnología desde una perspectiva ingenieril, considera a la tecnología “en sí misma”; esto es, la tecnología se constituye en el sujeto de la reflexión. Aquí la indagación toma como punto de partida “la forma tecnológica de vivir en el mundo” (Mitcham, 1989: 49) y a partir de ella se analizan los diversos aspectos de las acciones productivas del ser humano. La otra tradición, la filosofía de la tecnología desde las humanidades, se ha ocupado de indagar sobre el significado de la tecnología y su impacto en la sociedad y la cultura. Aquí la tecnología es objeto de una reflexión desde las ciencias sociales y las humanidades con una actitud predominantemente crítica, a partir de que las humanidades se reconocen como un campo anterior y de alcance más vasto que el mundo técnico.

Andrew Feenberg ha distinguido a su vez tres teorías fundamentales que colocan el énfasis en la naturaleza política y social del fenómeno de la tecnología, a la par que caracterizan las actitudes que asume el ser humano frente al avance tecnológico (Feenberg, 2002). Estas teorías son la teoría instrumental, la teoría sustantivista y la teoría crítica, esta última también recientemente designada por el autor como constructivismo crítico (Feenberg, 2017b; Feenberg, 2020). Nos limitaremos aquí a presentar un esbozo general de cada una de ellas para analizarlas luego con mayor detalle en el el Capítulo III de este trabajo. Por un lado, la teoría instrumental se establece a partir de una cierta idea intuitiva de la tecnología –y quizás por este mismo motivo se trata de una perspectiva que genera una rápida adhesión y que se encuentra bastante naturalizada– como un simple medio o instrumento para alcanzar un cierto objetivo. Esta visión considera a la tecnología como un hecho establecido e inevitable, un aspecto más del “orden práctico” de la vida cotidiana, sin mayor trascendencia filosófica en sí misma. Aunque no de manera excluyente, esta mirada neutral y reduccionista suele también

para adaptar los objetos esenciales a los distintos contextos técnicos. Por su lado, el enfoque antropométrico también intenta definir la tecnología a partir de una serie de componentes universales. En el caso de las acciones técnicas, estos componentes son las regularidades en los atributos físicos y cognitivos del ser humano a partir de las cuales se explicarían las decisiones y acciones técnicas. En el caso de los objetos técnicos, el enfoque antropométrico no define una colección de objetos elementales sino más bien procura identificar los elementos fundamentales en el diseño de un artefacto en función de los distintos contextos de producción y uso. Un desarrollo analítico sobre el recorrido histórico estas dos ontologías técnicas puede verse en Sandrone (2017).

estar asociada en la academia con las ciencias exactas, las cuales conciben a la tecnología como la mera extensión de leyes y conocimientos científicos a la esfera de las aplicaciones prácticas (Kroes y Meijers, 2006; Mitcham y Schatzberg, 2009). En definitiva, en la visión instrumental la tecnología se representa como un simple vehículo, natural y necesario para el progreso y la modernización de la sociedad.

Por otro lado, en la vereda opuesta al instrumentalismo, la teoría sustantivista identifica a la tecnología como un fenómeno dotado de una esencia negativa, con independencia de las contingencias que asuma en cada contexto particular. El sustantivismo rechaza de plano la tecnología y ve en ella una verdadera causa de la decadencia del espíritu y del desapego de las tradiciones nobles del ser humano, síntomas característicos de los tiempos modernos.

No obstante el contraste evidente entre las teorías instrumentalista y sustantivista, es importante señalar la coincidencia de ambas en concebir a la tecnología como algo inevitable. Si bien se arriba a este punto común por vías abiertamente opuestas, para las dos teorías la tecnología constituye un fenómeno dotado de una esencia inmodificable.

Finalmente, la teoría crítica expresa la propia posición de Andrew Feenberg frente a la tecnología. Considera a la misma como reflejo del orden social vigente y también como un espacio de acción política. Lejos de concebirla como un fenómeno inmutable, la teoría crítica propone una transformación profunda de la tecnología para que esta responda a las necesidades humanas y para la necesaria democratización de la sociedad. Sin embargo, para que esa transformación sea genuinamente democrática, los cambios en el desarrollo tecnológico no deberían ser comandados de manera exclusiva por una élite profesional. El argumento de Feenberg es que estos grupos están formados bajo una racionalidad que garantiza la validación y defensa de un patrón tecnológico fijo, orientado a mantener el privilegio de intereses particulares que se sirven de la tecnología para ejercer su dominio sobre las mayorías populares. Feenberg propone un debate abierto y de carácter horizontal, con activa participación ciudadana, como un elemento indispensable para la democratización de la tecnología (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002).

Desde luego, estas diferentes concepciones sobre la tecnología no son completamente independientes entre sí y sus visiones se entrecruzan en varios aspectos. En mayor o menor grado, cada una de estos enfoques va a contribuir a nuestra descripción ontológica de los objetos tecnoló-

gicos en general y, dentro de este universo, la de los objetos biotecnológicos que construye la biología sintética con sus propios rasgos particulares. Este examen nos proporcionará las herramientas necesarias para luego examinar en mayor detalle la perspectiva de la teoría crítica centrada en la carga política inherente a los objetos de la biología sintética y a la tecnología de los biocombustibles.

2.1.2. *El mundo artificial, la ingeniería y el diseño*

Tanto una planta que crece en forma espontánea en el monte como una planta de maíz híbrido cultivada en un terreno adaptado a la producción agrícola son organismos biológicos. La existencia de ambas plantas está gobernada por las mismas leyes naturales de la física y la biología que la ciencia ha comenzado a describir desde hace más de tres siglos y que revisten, en tanto leyes científicas, un carácter universal. Más allá de esta similitud, al momento de asignar una categoría a cada una de estas plantas, es probable que la primera sea considerada como una planta natural, mientras que en el segundo caso, la planta de maíz híbrido sea considerada, al menos en parte, como un organismo de carácter artificial. Herbert Simon, un economista y filósofo estadounidense que estudió en profundidad la esencia de lo artificial, previene acerca de lo ligero o confuso que puede resultar hacer una analogía directa de lo biológico con lo natural; por ejemplo, cuando sostiene que “un campo arado no es ni más ni menos natural que una calle asfaltada” (Simon, 1996: 3). En realidad, parece bastante improbable encontrar en el mundo un ambiente donde de una u otra manera no aparezcan señales de lo que consideramos artificial; aún muchos de los organismos biológicos que nos rodean parecen estar también atravesados por rasgos artificiales. ¿Qué distingue entonces lo artificial de lo natural? Los objetos artificiales o artefactos revisten esa condición porque en su construcción, total o parcial, hay un rastro de la agencia humana (Simon, 1996). La intervención humana es precisamente lo que confiere a un objeto el carácter artificial. Luego, a partir de esta caracterización de lo artificial, podemos establecer un concepto general de lo que es el diseño, como el proyecto o la creación de un plan racional para el cumplimiento de determinados fines. Tanto la planta de maíz, como la calle asfaltada, o cualquier objeto de uso doméstico como una plancha, han sido concebidas y construidas siguiendo un plan establecido que no es azaroso sino que está racionalmente orien-

tado, para que los objetos cumplan con una determinada función. Y esto es justamente lo que concierne a la ingeniería, término al cual podríamos definir como el conocimiento y la práctica para diseñar y construir objetos artificiales con determinados atributos o funciones, que responden a necesidades humanas (Simon, 1996).

Simon contrasta a la ingeniería con la ciencia. En tanto esta última se ocupa del análisis y la descripción de los objetos naturales, la ingeniería se relaciona con el diseño y la síntesis de objetos artificiales (Simon, 1996)². Asimismo, la ciencia describe los objetos del mundo natural cuyo modo de existencia no está sujeto al cumplimiento de ninguna pauta particular, más allá de la propia normativa del objeto. La ingeniería en cambio sí prescribe, expresamente, cómo deben trabajar los objetos artificiales para cumplir la función que se les ha asignado. Este punto introduce otro rasgo propio de la ingeniería y el diseño que es el aspecto normativo. Simon sostiene que cuando “los objetos artificiales son diseñados, se discuten tanto en términos descriptivos como también imperativos” (Simon, 1996: 5). Los objetos diseñados *deben* funcionar de determinada manera y por lo tanto necesariamente deben ajustarse a ciertas normas. No nos ocuparemos ahora de analizar la naturaleza de esta normatividad pero sí apuntaremos que esta puede ser de dos clases diferentes: una normatividad intrínseca, propia del objeto en sí, y una normatividad extrínseca propia del contexto que rodea al objeto. Simon sostiene que un objeto puede ser analizado de acuerdo a la relación que exista entre un medio interno, definido por la propia naturaleza material del objeto, y un medio externo, definido por las características del ambiente inmediato al objeto. La adecuación del medio interno a las contingencias del medio externo será una medida de la eficacia del objeto en el cumplimiento de una función determinada. El punto de encuentro entre estos dos medios es lo que el autor llama interfase. “La descripción de un objeto artificial en términos de la organización y el funcionamiento

² En su obra *Las ciencias de lo artificial*, Herbert Simon (1996) contribuye a formalizar una teoría del diseño y de las ciencias artificiales en general. El autor apunta que la enseñanza del diseño es el núcleo de la formación profesional. Sin embargo, en el curso del siglo XX, las universidades la han desplazado progresivamente de sus planes de estudio, sustituyéndolas por la instrucción en ciencias formales y naturales. Las facultades de ingeniería forman profesionales a partir de la enseñanza de matemáticas y física, las cuales son adjetivadas como “aplicadas”, antes que en los métodos y las prácticas específicas de diseño. Este desplazamiento obedece en buena medida a una cuestión de prestigio y jerarquía de las ciencias por sobre la experiencia del ejercicio profesional especializado.

de la interfase entre los ambientes interno y externo es el objetivo principal de la actividad de invención y diseño” (Simon, 1996: 9). El diseño es entonces un reflejo de la capacidad de armonizar la normatividad del medio interno con la normatividad del medio externo.

Ahora bien, en un objeto artificial la interfase puede ser concebida también como el espacio de diseño, el ámbito donde se manifiestan los propósitos del diseñador. De acuerdo al concepto de diseño que sostenemos en este trabajo, la adaptación entre los medios interno y externo implicará mucho más que una cuestión estrictamente técnica o instrumental. Simon parece enfocarse en lo atinente a la función del objeto en relación al medioambiente físico que lo contiene sin considerar cómo el contexto social implica o condiciona el diseño y la función del objeto. En ese sentido, podemos afirmar que Simon tiene una visión “funcionalista” o puramente instrumental del diseño y de la función de los artefactos, como si la conformación de los mismos estuviera desprovista de cualquier interés (sin que esta limitante real opaque, por supuesto, la brillantez en la argumentación y claridad conceptual en el terreno en que el autor desarrolla su trabajo).

Andrew Feenberg ha examinado desde una perspectiva sociológica los aspectos que condicionan las decisiones en torno al diseño tecnológico. El autor alega que detrás de aquello que suele presentarse como distintas alternativas técnicas en torno al diseño de un objeto, existe una disputa de carácter político entre distintos actores sociales, interesados por hacer prevalecer la configuración que preserve mejor sus propios intereses (Feng y Feenberg, 2008). Lejos de ser neutral y aún cuando no siempre se manifieste de manera evidente, el diseño de un artefacto tecnológico conlleva una carga de valores que refleja un cierto sentido común o racionalidad social. Este componente social del diseño es impuesto por actores hegemónicos que procuran así reproducir su condición dominante. Feenberg llama código técnico a esta racionalidad que se expresa como un imperativo técnico lógico e inevitable, al tiempo que enmascara la naturaleza política implicada en el diseño de los artefactos (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002). Más adelante en el Capítulo III, volveremos a examinar con más detalle el concepto y los aspectos normativos del diseño en el marco de la teoría crítica de la tecnología. Previo a esto, y para poder entender por qué se le atribuye un carácter tecnológico, necesitamos enfocarnos en la clase de objetos que la biología sintética produce y en los factores que rigen el funcionamiento de estos objetos.

2.2. La naturaleza de los objetos tecnológicos

¿En qué sentido se afirma que la biología sintética es una disciplina tecnológica? La biología sintética es un campo todavía más cercano a las propuestas y a la imaginación de grandes proyectos que a las realizaciones concretas. Sin embargo, y de acuerdo a una premisa impuesta por los propios especialistas en la materia, para la comprensión acabada de un sistema biológico no es posible prescindir de su replicación en forma artificial (Endy, 2005)³. Resulta lógico preguntarse entonces por la naturaleza de los productos que la biología sintética construye. ¿Por qué es posible afirmar que estos productos son objetos tecnológicos? Para responder estas preguntas, discutiremos en primer lugar distintas teorías acerca de las condiciones que debería reunir una entidad para ser considerada un objeto tecnológico. Luego se analizarán las diferentes clases de productos construidos por la biología sintética y evaluaremos si efectivamente satisfacen las condiciones impuestas. Finalmente, volveremos sobre un problema que hemos comenzado a examinar en el capítulo anterior y que surge a partir de una presunta contradicción. Un debate clásico en la historia de la filosofía, que la biología sintética ha contribuido a renovar con fuerza, es el establecimiento de una línea divisoria clara entre lo natural y lo artificial. Los artefactos tecnológicos, como hemos visto, son objetos creados por el ser humano que constituyen el mundo artificial. Más allá de que Simon nos advierte acerca de lo apresurado que resulta asimilar lo biológico con lo natural, parece contraintuitivo pensar que los sistemas vivos son objetos enteramente artificiales. Al menos el funcionamiento del metabolismo basal de los organismos claramente precede a cualquier tipo de agencia humana. En todo caso, si los productos de la biología sintética son efectivamente objetos tecnológicos, una pregunta relevante podría ser cómo se conjugan los elementos naturales y artificiales en un organismo viviente.

³ Para graficar el alcance de los propósitos de la biología sintética, sus mentores suelen citar con frecuencia la famosa frase del físico Richard Feynman “lo que no puedo construir no lo puedo entender”. Esta sentencia recuerda la perspectiva de la “biología sintética” tal como la concebían Stéphane Leduc y otros investigadores a principios del siglo XX, en lo que se refiere al imperativo de recrear los fenómenos biológicos de manera artificial para poder comprenderlos cabalmente.

2.2.1. *Materia, Intención y Función*

Si la filosofía de la tecnología es un campo de estudios relativamente reciente, más joven aún es el estudio que se enfoca en la ontología de los objetos técnicos, un territorio que cuenta con apenas dos décadas de exploración sistemática (Houkes *et al.*, 2011). Simon desarrolló una caracterización basada en las variables que afectan el diseño y la función de los artefactos sin profundizar en la esencia que los define como tales. La filosofía contemporánea de la tecnología ha problematizado esta cuestión indagando en la esencia de los objetos tecnológicos. Para ensayar entonces una caracterización ontológica de los objetos construidos por la biología sintética, es pertinente detenerse primero en tres enfoques teóricos que han contribuido a describir la naturaleza de los artefactos tecnológicos, a la par de precisar los rasgos que los diferencian de otras clases de objetos. Los tres enfoques referidos son el funcional, el intencional y el dual (Vega, 2009; Lawler, 2010). La diferencia fundamental entre estos enfoques gira en torno al origen de la función en los artefactos tecnológicos. El interrogante formulado aquí es ¿qué es o dónde reside aquello que determina la función de un artefacto?

Para el enfoque funcional la función de un artefacto se origina en el artefacto mismo, es decir, en la naturaleza física y química que le es propia y le confiere una serie de capacidades materiales específicas. Este enfoque tiene su origen en un concepto de función surgido de las ciencias biológicas (Cuevas Badallo, 2016)⁴. La función de un órgano o de

⁴ En Biología hay actualmente dos teorías que explican el concepto de función: la teoría histórico-etiológica y la teoría sistémica (Cuevas Badallo, 2016). La teoría histórico-etiológica desarrollada por Larry Wright y más tarde por Ruth Millikan y Karen Neander atribuye una función determinada a un órgano (o a un proceso biológico), cuando en virtud de esa función, el órgano ha sido favorecido por la selección natural. Por ejemplo, la función del corazón en un organismo es bombear sangre, si y solo si es por ese fenómeno que el corazón ha sido seleccionado durante su historia evolutiva. Esto es, la causa de la atribución de una función a un órgano en el presente, se explica a partir de las consecuencias de la presencia de ese órgano en el pasado, en un linaje de organismos precedentes que da cuenta de una historia reproductiva del órgano en el cumplimiento de esa función. En términos más sencillos, el corazón tiene la función de bombear sangre porque tiene una historia en hacerlo, y porque por ese rasgo funcional es que ha sido seleccionado. En la versión de Millikan de la teoría histórico-etiológica el concepto de función en los fenómenos biológicos puede ser extendida a los fenómenos artificiales. Así, sería posible atribuir a un artefacto una función en tanto la misma cuenta con un linaje, una

una vía bioquímica, por ejemplo, depende causalmente de su propia estructura material para producir un determinado efecto. La asignación de funciones a los fenómenos biológicos puede considerarse de una manera más general y extenderse a los fenómenos artificiales. En este caso, la materialidad misma del artefacto es el determinante de su funcionalidad. A manera de síntesis, “sin objeto material, no hay capacidad física, y sin esta, no hay función técnica” (Kroes y Meijers, 2006:3). Sin embargo, aunque tanto los órganos biológicos como los artefactos tecnológicos son entidades materiales y aunque ambos se encuentran integrados causalmente a sistemas más complejos que definen sus funciones, existe una diferencia crucial entre estas dos clases de entidades que limita una simple proyección lineal de la teoría de las funciones biológicas al mundo artificial. Concretamente, resulta problemático asignar a los fenómenos biológicos una función orientada hacia un objetivo determinado; esto es, aceptar una carga o componente teleológico en su funcionalidad. La existencia de los organismos responde a un proceso de selección que es ciego, es decir, natural. En cambio, la creación de artefactos es un proceso sesgado, donde opera un proceso de selección artificial. La dirección de este proceso está inscrita en el diseño y en los modos de uso, elementos que conllevan un componente de carácter intencional.

Para el enfoque intencional, la función de un artefacto es una variable dependiente de la intención de los diseñadores y de los usuarios. Aquí, el componente que define a la función no reside en el artefacto en sí, sino en un estado mental de un agente que se expresa como una intención. Un artefacto es lo que es porque fue creado con la intención de que sea lo que es (Vega, 2009; Lawler, 2010). Así, el componente

colección de artefactos previos sobre los cuales ha operado históricamente la copia y la selección como mecanismos de reproducción del objeto.

Por otra parte, la teoría sistémica afirma que la función de un órgano se puede explicar solo como parte de un sistema mayor al cual está integrado causalmente. Así, la función del corazón de bombear sangre se atribuiría a partir de su integración junto con otras partes (la sangre, los vasos sanguíneos) a un sistema mayor, el sistema circulatorio, propio de los organismos con capacidad para hacer circular el oxígeno por su cuerpo. Antes que fundarse en los efectos pasados, la atribución de una función a un determinado ítem sería consecuencia de la actividad complementaria e integrada, junto con otros ítems, para la concreción de una capacidad más general. Un detalle sobre las teorías explicativas del concepto de función biológica y las ventajas y objeciones que pueden formularse a cada una de ellas puede consultarse en Parente y Crelier (2015) y en Cuevas Badallo (2016).

intencional es un factor que constituye al artefacto y que explica su función. Tal como afirma McLaughlin (2001):

La función de un artefacto es derivada del propósito de un agente de hacer o de apropiarse [para su uso] de un objeto; es conferida al objeto por los deseos y creencias de un agente. Sin agente, no hay intención, y sin esta, no hay función (p. 60).

Ahora bien, el problema para entender la naturaleza de un artefacto y su función se desplaza entonces hacia el significado de lo que es una intención. Risto Hilpinen y Amie Thomasson se han ocupado de esta cuestión. Hilpinen (1993) afirma que un objeto deviene artefacto cuando ha sido producido por un autor. Artefacto, autoría e intencionalidad son aquí conceptos inherentes entre sí. Pero no se trata de la intención en un sentido general, vago o abstracto. La autoría depende de que un *cierto tipo* particular de intenciones se hayan formulado para la producción del artefacto. Esas intenciones implican que el autor, para ser identificado como tal, lleve a cabo su acción con un conocimiento previo de la clase de artefactos a la que responde aquello que pretende diseñar y producir. Y más aún, otra condición que Hilpinen establece es que el intento del autor se concrete como logro en forma más o menos eficaz. De otra manera no se podría hablar de autoría estricta ya que el resultado final no reflejaría la intención original del pretendido autor. En otras palabras, el resultado final debe guardar concordancia con la intención, que a su vez, debe ser consistente con un concepto previo de la clase de artefacto que se quiere producir. Thomasson (2003) define en términos formales estos principios de dependencia expresando que:

Necesariamente, para todo x y para toda clase artefactual K , x es un K si y sólo si x es el producto de una intención en gran medida exitosa de (Kx) , donde uno intenta (Kx) si y sólo si se tiene un concepto sustantivo de la naturaleza de los Ks que se ajusta al concepto de los hacedores previos de Ks (si es que hubiere alguno) y donde uno intenta realizar ese concepto imponiendo características relevantes de K en el objeto (p. 599).

Por ejemplo, si x tiene la intención de hacer una tijera, para que ello se concrete deberá contar con: (a) la intención original de hacerla, (b) una serie de conceptos previos acerca de las propiedades del artefacto

tijera: dos hojas afiladas unidas entre sí en un punto, un mango que permita el manejo con dos dedos en cada uno de los extremos de las hojas, una cierta punta en el otro extremo de las hojas, capacidad para cortar determinados materiales etc., (c) la capacidad para concretar la producción efectiva de la tijera, (d) Un criterio de evaluación acerca del resultado final alcanzado en la producción de la tijera. En resumen, el enfoque intencional se constituye a partir de un concepto fuerte de autoría como rasgo esencial en la descripción de un artefacto (Lawler, 2010; Parente y Crelier, 2015).

Las principales objeciones que han sido señaladas en el enfoque intencional están referidas al significado y el alcance de las intenciones humanas. Por ejemplo, Lawler (2010) plantea que las intenciones de los hacedores no necesariamente están formuladas de manera acabada antes de iniciar la producción del artefacto. La teoría intencional parece ser bastante estricta cuando prescribe los requisitos para acceder a la categoría de autor genuino, ya que demanda al hacedor un grado de intención que implica un alto conocimiento de la clase de objeto que pretende producir. Sin embargo, aún con un nivel de conocimiento previo importante en el tópico específico, el propio proceso de construcción del artefacto puede revelar facetas nuevas que no estaban presentes en la mente del hacedor al inicio de su tarea. Aquí lo que se intenta valorizar es el acto de la práctica, definida no como mera ejecución de algo que ya está acabado en la mente del autor sino como un componente mismo del proceso de concepción del artefacto:

La sugerencia es que parte de lo que sea el contenido de la intención viene dado por lo que efectivamente se hace, y esto último no está completamente decidido de antemano; por el contrario, hay deliberaciones que se abren durante la acción misma, y que afectan el contenido de la intención que el agente forma de manera tal que el agente descubre lo hecho, para decirlo de algún modo, en lo hecho mismo (Lawler, 2010: 121).

El cuestionamiento resuena con particular fuerza cuando se aborda un proceso de innovación. ¿Qué es exactamente poseer el concepto sustantivo de una clase de artefactos, como parte del contenido de la intención original, cuando lo que se pretende es justamente desarrollar un artefacto novedoso? (Vega, 2009). En síntesis, el proceso de construcción mismo muchas veces va guiando y delineando, y en buena me-

didada se constituye en complemento de la intención original, la cual difícilmente se encuentra definida de manera absoluta antes del inicio del proceso. No se trata de una situación de contraste total entre la posesión o no de la intención de hacer un artefacto con todas sus características puntillosamente conocidas. Hay matices intermedios entre ambos grados de intencionalidad que se resuelven en el hacer mismo del artefacto.

Los dos enfoques analizados, funcional e intencional, suponen dos representaciones del mundo que remiten a un problema filosófico clásico: el dilema entre cuerpo y mente. En la primera representación, el mundo se mira como un conjunto de objetos físicos que se vinculan mediante conexiones causales. En la segunda, la mirada se establece a partir de las creencias e intenciones de los agentes humanos y sus consecuentes acciones productivas (Kroes y Meijers, 2006; Vega, 2009). Precisamente, el punto de partida de la tercera teoría que vamos a examinar es que resulta necesario combinar estas dos representaciones para describir de manera apropiada la naturaleza de los artefactos. Esta teoría ha sido propuesta originalmente por el grupo de filosofía de la Universidad Tecnológica de Delft, Países Bajos, en el *Programa de la naturaleza dual de los artefactos* y ha actuado como guía de buena parte de las discusiones de los últimos años sobre la ontología de los artefactos. Bajo este marco teórico, los objetos tecnológicos son considerados como objetos híbridos, conformados por una naturaleza doble (Kroes y Meijers, 2006; Kroes, 2012). En primer lugar, los artefactos tecnológicos son entidades materiales con una existencia física definida. Esta materialidad es indispensable para el desarrollo de una función y es además lo que los diferencia de otros objetos de naturaleza social, por ejemplo el valor monetario de los bienes o las leyes, que se definen de acuerdo a convenciones y cumplen su función sin necesidad de contar con una existencia material. También establece una diferencia con fenómenos sociales como el conocimiento, la educación y diversas prácticas que, aún siendo parte de lo que se designa genéricamente como tecnologías, no son entidades de naturaleza física. En segundo lugar, los artefactos técnicos están diseñados y construidos intencionalmente, esto es, están orientados hacia el cumplimiento de ciertos propósitos específicos. Kroes y Meijers (2006) señalan que los artefactos son objetos producidos en dos sentidos diferentes. Por un lado, “son producidos físicamente en el sentido en que los objetos físicos implicados son típicamente diseñados y fabricados por seres humanos” (Kroes y Meijers, 2006: 1). Este concepto

hace referencia a la producción de tipo material; la producción de artefactos depende *causalmente* de la intención humana. Por otro lado, “son producidos en el sentido de que es solamente en relación con la intencionalidad humana que los objetos físicos se vuelven artefactos tecnológicos” (Kroes y Meijers, 2006: 1). Esta sentencia apunta a una producción en un sentido conceptual. El concepto de artefacto es inherente al de producción intencional; la producción de artefactos depende *conceptualmente* de la intención humana. La intencionalidad se refleja en la realización de un determinado diseño orientado hacia una finalidad, de forma tal que los artefactos tienen incorporado un componente teleológico. Y este es el aspecto que establece la diferencia entre los objetos tecnológicos respecto de otra clase de objetos físicos, los objetos naturales. Una piedra, una montaña y un organismo (en estado salvaje) son objetos naturales y, como tales, carecen de una finalidad específica. Es importante discriminar que los organismos vivos tienen una suerte de “mandato” o teleología que los lleva a cumplir un programa vital específico. Pero esta teleología es diferente a la de los objetos artificiales porque responde a una normatividad propia. La normatividad intrínseca de los organismos se rige por las leyes naturales de la física y la química de los sistemas biológicos; esto la diferencia de la normatividad extrínseca, aplicada sobre los objetos por la intención humana para que estos cumplan una cierta función. Sin embargo, el escenario es diferente cuando un organismo resulta modificado por la agencia humana. En este caso si se ha aplicado sobre el organismo una normatividad extrínseca, por ejemplo, a través de la incorporación de una nueva vía metabólica en un organismo para la producción de un fármaco o de un biocombustible. La nueva vía metabólica no está aislada sino más bien integrada, a través de una serie de reacciones químicas, a un metabolismo general que se rige por su propia normatividad. En este tipo de organismos, a los que se ha propuesto denominar como bioartefactos, se da entonces la coexistencia de una doble normativa, intrínseca y extrínseca. Los bioartefactos se analizan en detalle en el apartado 4 de este capítulo.

Por supuesto, el requisito de modificación intencional es una condición necesaria pero no suficiente para que un objeto sea considerado como un artefacto tecnológico. Se asume que existe una voluntad de diseño racional para llevar a cabo tal modificación, lo cual implica el uso lógico del mejor conocimiento disponible para asignar a un objeto una función determinada (Lawler, 2010). En suma, para el enfoque dual

un objeto técnico se caracteriza por su naturaleza híbrida. Por un lado, un componente de materialidad, propio del objeto en sí o como tal; por el otro lado, un componente humano que se vuelca sobre el objeto físico y lo revela como objeto tecnológico, con un propósito o diseño intencional orientado al cumplimiento de un objetivo (Kroes y Meijers, 2006). Ambas representaciones son complementarias en la descripción ontológica de un artefacto, descripción que pretende ser universal e intenta dar cuenta de cualquier objeto del mundo artificial, independientemente de su complejidad. Es importante apuntar que el Programa de la Naturaleza Dual de los Artefactos se apoya en los conceptos de Simon de medio interno y medio externo (p. 52) para describir a los artefactos técnicos. Trazando un paralelo entre los dos enfoques, el medio interno refiere a la estructura física del artefacto (lo que el artefacto es), la materialidad como soporte necesario para la aplicación de una función. A su vez, el medio externo refiere a la relación del artefacto con el mundo, esto es, la adaptación necesaria para poder cumplir una función asignada (lo que el artefacto debe ser) (Kroes, 2012).

Una cuestión crucial a resolver es el tipo de vínculo que se establece entre estos componentes de naturaleza dispar que se combinan en un objeto técnico. ¿Cómo se relaciona la estructura física con las intenciones humanas? En el enfoque dual, la conexión entre estos dos elementos se establece a partir de la función técnica (Vermaas y Houkes, 2006). La asignación de una función a un objeto es un acto en el que se vincula su capacidad física para cumplir con un plan de uso determinado, orientado hacia el logro de un objetivo explícito. En palabras de los autores “una función técnica en un artefacto puede ser descripta en términos generales como el rol que el artefacto juega dentro de un plan de uso que está justificado y comunicado a los posibles usuarios” (Vermaas y Houkes, 2006: 8)⁵.

⁵ Vermaas y Houkes (2006) construyen un marco teórico para la adscripción de funciones en los objetos tecnológicos que denominan Teoría *ICE* (Intencional-Causal-Explicativa). La *ICE* desarrolla los conceptos de uso y diseño de los artefactos en términos de planes de uso. Un plan de uso para un artefacto x es una serie de acciones que contemplan la manipulación de x y contribuyen al alcance de un determinado objetivo. La cláusula *I* significa que al adscribir funciones a un artefacto, un agente presume que el artefacto tiene la capacidad para cumplir una determinada función cuando es manipulado acorde a un plan de uso establecido y que esa capacidad contribuye a la concreción de los objetivos del plan. La condición *C* demanda que el agente sea capaz de justificar causalmente su creencia. Finalmente, la cláusula *E* requiere que los diseñadores comuniquen a los potenciales usuarios que el artefacto que han producido tiene la capacidad de cumplir la función adscrita.

La conexión entre el componente material y el intencional tiene una característica singular: es en cierto sentido flexible y se representa mediante la imagen de un puente levadizo que permite unir pero también separar ambos componentes. Así, en la adscripción de una función, los distintos agentes (diseñadores y usuarios) pueden dar preferencia a uno de los dos elementos que caracterizan un artefacto, sin considerar o dejando implícito al otro. Por una parte, los ingenieros y profesionales en su rol de diseñadores pueden destacar la descripción de las capacidades físicas de un artefacto para cumplir una función, por ejemplo un automóvil, sin mayores especificaciones acerca del plan de uso, que queda entonces abierto y en manos de los usuarios. De manera inversa, los usuarios pueden ejecutar planes de uso de un artefacto de manera más o menos intuitiva o libre, por ejemplo asignando distintos roles a un teléfono celular, sin proponerse averiguar los mecanismos físicos que posibilitan el cumplimiento de sus funciones. Se han propuesto varias formas de adscribir funciones a los artefactos técnicos mediante diferentes tipos de modos de uso y planes de diseño. Vermaas y Houkes (2006) distinguen un uso pasivo, idiosincrático e innovador y un diseño experto y productivo. Los usuarios pueden hacer un uso pasivo de los artefactos, ejecutando un plan de funciones preestablecido y sin necesidad de conocer en detalle sus atributos físicos. Pueden también hacer un uso idiosincrático, cuando se adoptan planes de uso propios e intuitivos que pueden ser alternativos a los establecidos originariamente. En este caso, el plan de uso también se establece en base a la experiencia de los usuarios y prescinde de un mayor conocimiento de los mecanismos físicos que confieren al artefacto la capacidad para el cumplimiento de su función. El uso innovador de un artefacto también es de tipo idiosincrático pero extiende el plan de uso a un grupo de usuarios, a través de la comunicación de las “nuevas capacidades” del artefacto. La diferencia entre ambos modos es que en tanto el plan de uso idiosincrático es de tipo personal, el de uso innovativo tiene un carácter interpersonal. Nuevamente, el plan de uso innovador implica aquí la adscripción de funciones sobre la base de una experiencia, sin conocimiento exhaustivo de los fundamentos físicos que determinan la capacidad del artefacto. Además, el acto de comunicar el modo de uso a un grupo de personas demanda no solo la ejecución sino también la construcción de un plan de uso alternativo. Podría hablarse entonces, en un sentido elemental, de un cierto tipo de diseño, además de una forma de uso. En los tres

casos de uso descriptos, la característica fundamental es que se trata de un plan basado en la intuición y la experiencia cotidiana. Los autores distinguen aún dos clases más de diseño y uso de artefactos, basadas en un conocimiento teórico y científico antes que empírico. El rediseño implica la construcción de planes de uso nuevos desarrollados por ingenieros y expertos. En este caso, los fundamentos de la capacidad de los artefactos para realizar una función son conocidos de manera rigurosa, a partir de una base de conocimiento científico de su estructura material. Finalmente, el diseño productivo supone, además del conocimiento acabado de las capacidades físicas del artefacto, el desarrollo de un nuevo producto y su correspondiente plan de uso. En los dos últimos casos se establece una conexión conceptual entre la descripción de la naturaleza física del artefacto y la descripción intencional de ejecutar un determinado plan de uso para concretar un objetivo. En síntesis, “El concepto de funciones técnicas conecta las dos naturalezas, funcional e intencional, de los artefactos pero también permite separarlas” (Vermaas y Houkes, 2006: 5).

Anteriormente mencionamos el fuerte impacto que en los últimos años ha tenido el enfoque dual en la filosofía de la técnica. Algunos autores han señalado una serie de objeciones y se han propuesto complementar o expandir este enfoque con visiones más abarcadoras. Por ejemplo Mitcham (2002), discute los conceptos de “artefacto técnico”, “naturaleza y “enfoque dual” y sugiere un ajuste en la terminología de la teoría argumentando que i) todos los artefactos, incluidas las obras de arte, tienen un carácter técnico. Sin embargo, las obras de arte no son una clase de objetos contemplados en el programa dual de los artefactos; más bien el programa refiere solo a una serie particular de artefactos que son aquellos producidos por la ingeniería. Para Mitcham resulta tautológico hablar de “artefactos técnicos”. El autor encuentra apropiado observar esta distinción y propone la expresión “artefactos de la ingeniería” antes que la de “artefactos técnicos”; ii) no hay un concepto unívoco de la voz “naturaleza” en la historia de la filosofía; en algunas acepciones puede resultar contradictorio hablar de “naturaleza” para referirse a un artefacto. Mitcham propone entonces el término “carácter” para referirse a los atributos constitutivos de un artefacto; y finalmente, iii) la estructura física y la intencionalidad no necesariamente son los únicos rasgos que definen un artefacto. Para Mitcham, atribuir únicamente un carácter “dual” a un artefacto impone una restricción

que oculta otro tipo de propiedades, físicas y no físicas, que también forman parte de los objetos técnicos (Mitcham, 2002).

Otra línea crítica argumenta que el concepto de función está sobre-determinado en el enfoque dual y señala que los artefactos contienen una serie de atributos que, si bien forman parte de las intenciones, no necesariamente están relacionados con una función determinada (Vaesen, 2011). Como ejemplo, el autor considera la diferencia entre *Microsoft Word*, *OpenOffice Writer* y *LaTeX*. Aún cuando estos artefactos son funcionalmente equivalentes –*softwares* para la producción de documentos de texto–, son diferentes en aspectos intencionales no vinculados con una función. Por ejemplo, difieren en el acceso, libre o no, para el uso del artefacto y en el rol que le asignan al usuario en la producción del documento. Finalmente, una tercera posición crítica se asienta sobre el escaso peso que el enfoque dual asigna a las prácticas sociales como componente de la naturaleza de los artefactos (Schwyter, 2009). De acuerdo a este autor, el enfoque dual agota el concepto de función en su carácter instrumental o mecanicista y no atiende propiamente “[...] la función misma como fenómeno sociotécnico incluido en un denso medio de prácticas sociales” (Schwyter, 2009: 103). Schwyter propone un enfoque colectivista y constructivista de la función técnica para lograr una descripción más acabada de la naturaleza de los objetos tecnológicos⁶.

⁶ Al igual que Vaesen (2011), Schwyter también propone relativizar el énfasis que el enfoque dual coloca en el concepto de función. Antes que un puente entre la estructura y la intención, la función es un producto derivado de procesos e instituciones sociales a través de las cuales se construye la naturaleza de los artefactos, sus prácticas de uso y sus aspectos normativos. A partir de las teorías de Martin Kusch y el Programa Fuerte de los estudios sociales de la tecnología, Schwyter distingue tres clases distintas de entidades que se establecen socialmente mediante diferentes prácticas de referenciación. Por un lado, las *clases naturales* (*N-kinds*) son aquellas caracterizadas a través de un conjunto de rasgos empíricos verificables que referenciamos en un patrón previamente establecido. Los objetos naturales, como un animal o un río, están incluidos en esta categoría y su existencia va más allá o es independiente de la referencia que los humanos empleamos para conceptualarlos. Por esta razón las clases naturales son entidades alter-referenciales. Por otra parte, las *clases sociales* (*S-kinds*) son aquellas caracterizadas mediante referencias creadas por los mismos agentes humanos. La “valentía” es un ejemplo de *clase social*; se designa en referencia a una designación análoga previa y no tiene existencia independiente de la propia referencia, lo que hace a las *clases sociales* entidades auto-referenciales. Finalmente, en la tercera categoría se encuadran las *clases artificiales* (*A-kinds*), por ejemplo un sacacorchos, cuya naturaleza es intermedia entre las clases naturales y las clases sociales. Aquí están incluidos los artefactos que son simultáneamente objetos alter y auto-referenciales; esto es, tienen una existencia material independiente de las prácticas de re-

La mayoría de las críticas formuladas reconoce el valioso aporte teórico del enfoque dual en la filosofía de la tecnología, en particular en la descripción de la naturaleza ontológica de los artefactos. Antes que un cuestionamiento de fondo, los argumentos han apuntado a enriquecer y complementar la teoría de la doble naturaleza de los artefactos. En los párrafos siguientes adoptaremos este enfoque para extender el análisis ontológico a los productos de la biología sintética. Más adelante en los capítulos III y IV, esta perspectiva será complementada con el enfoque sociotécnico que propone Andrew Feenberg para caracterizar la estructura de los artefactos y la naturaleza general del fenómeno tecnológico.

2.3. Los productos de la biología sintética como objetos tecnológicos

Las tres grandes categorías en las que se agrupan las producciones de la biología sintética cumplen con las condiciones de materialidad física y diseño intencional que caracteriza a los objetos tecnológicos. Siguiendo una progresión creciente de complejidad técnica, estas categorías son: 1) los módulos estándar o *biobricks*, como es el caso del *toggle switch* o interruptor biológico, una de las primeras producciones de la biología sintética (Gardner *et al.*, 2000); 2) las modificaciones efectuadas en el genoma de organismos para crear nuevas vías metabólicas; por ejemplo, la producción de artemisinina o de biocombustibles en *Escherichia coli* (Martin *et al.*, 2003; Peralta Yahya *et al.*, 2012); 3) la construcción de un genoma mínimo para conformar una plataforma general de producción biotecnológica (Hutchison III *et al.*, 2016). Por un lado, todos estos productos son objetos construidos a partir del ensamble de materiales biológicos y moléculas químicas de existencia material. Por otro lado, la modificación intencional de organismos es el objetivo expreso de la biología sintética, cuya quintaesencia es el diseño racional de sistemas biológicos para dotar a los mismos con una función específica. Por cierto, la función puede cumplirse con distintos grados de eficacia; la cantidad y la calidad de biocombustible producido por un microor-

ferenciación, pero a la vez dependen de las prácticas sociales de auto-referenciación para adquirir un significado o estatus ontológico. En última instancia, para el enfoque colectivista los artefactos y la tecnología son productos cuyo sentido es asignado por la agencia humana, entendida esta en término de prácticas colectivas antes que individuales (Schryfer, 2009).

organismo modificado puede satisfacer o no los objetivos inicialmente planteados. Pero el análisis de los distintos grados de éxito en el objetivo buscado no cuestiona en este caso el componente de intencionalidad en sí mismo. La lógica de las intenciones reflejada en las prácticas de biología sintética están sometidas a criterios de entendimiento y validación que las respaldan, tal como es práctica corriente en las comunidades científicas y tecnológicas.

Aunque estas observaciones pueden aparecer algo obvias, hay sin embargo un aspecto relevante a considerar: ciertas características de los productos de la biología sintética no parecen responder a aquello que describiríamos como objetos tecnológicos prototípicos o convencionales (Schwyter, 2012). Al menos exhiben una cualidad notable que los diferencia de los objetos que a priori o intuitivamente relacionamos con lo tecnológico, sea esto un martillo o un avión supersónico. La razón de esta diferencia es que como disciplina biotecnológica, la biología sintética trabaja con organismos vivos, entidades que forman parte del mundo natural de los objetos animados. Por cierto, las modificaciones intencionales introducidas en estos organismos no los excluyen de su pertenencia al mundo natural⁷. Aún cuando hayan sido blanco de la ac-

⁷ Schwyter (2012) ensaya un cuestionamiento contraintuitivo interesante y se pregunta si los organismos vivos modificados mediante biología sintética aún siguen conservando su condición de objetos naturales. El autor analiza diferentes criterios para considerar un organismo como parte de un grupo o clase de entidades naturales. El más estricto de estos criterios, al cual el autor llama *esencialista*, propone que un organismo pertenece a una clase de objetos naturales cuando es portador de una serie de cualidades esenciales que no dependen de la intención humana y que son enteramente compartidas por todos los individuos de esa clase. La posesión de esas cualidades sería una condición necesaria y suficiente para ser miembro de esa clase. Ahora bien, el problema radica entonces en establecer cuáles son esos caracteres que constituyen las cualidades esenciales. El genoma natural, sin ninguna clase de alteración producida por la intervención humana, podría ser una cualidad esencial en un organismo para que este sea considerado como un objeto propio de una clase natural. Si este fuera el criterio, luego todos los organismos cuyo genoma ha sido modificado, incluidos por supuesto aquellos producidos mediante las técnicas de la biología sintética, no serían considerados como objetos naturales. Otro criterio, menos estricto que el anterior y basado en las *propiedades homeostáticas* de un organismo, requiere que para ser agrupados en una clase de objetos naturales los organismos cumplan con, si no todas, al menos algunas de una serie de cualidades consideradas esenciales. Así, un organismo podría contar en principio con alguna región adicional o una modificación en el genoma respecto a otros organismos de su misma clase. Sin embargo, el criterio de agrupamiento con arreglo a las propiedades homeostáticas impone la condición de que esa región adicional no implique una característica arbitraria o que no sea acorde a la tra-

ción intencional, los organismos no se han visto alterados en su dinámica autopoiética y continúan exhibiendo los rasgos propios de las entidades naturales animadas –capacidad autónoma de organización, homeostasis, crecimiento, desarrollo y reproducción– entre otros. Además, como todo organismo viviente, los productos de la biología sintética continúan sujetos a los cambios y transformaciones propios de las fuerzas naturales de la evolución. Tanto las funciones biológicas innatas como aquellas incorporadas intencionalmente no permanecen invariables a través del tiempo sino que están sujetas a la deriva evolutiva (Schwyter, 2012; Parente, 2014). En resumen, los organismos diseñados o modificados mediante biología sintética exhiben la naturaleza híbrida descrita para los artefactos tecnológicos convencionales. Pero tienen además, un rasgo que los distingue de estos y que les aporta una complejidad particular: son en simultáneo objetos naturales animados y artefactos tecnológicos. A partir de esta singularidad, intentaremos una caracterización ontológica de este tipo particular de artefactos: los bioartefactos (Parente, 2014; Cuevas Badallo, 2016).

yectoria evolutiva de esa clase de organismos. Una bacteria podría ser objeto de una modificación intencional en su genoma a los efectos de potenciar una característica natural del organismo; por ejemplo, mejorar su habilidad para crecer en un determinado sustrato. Esa diferencia no necesariamente la excluiría de su pertenencia a una clase natural basada en las propiedades homeostáticas puesto que el carácter introducido es en todo caso una modificación cuantitativa de algo que ya existía previamente de manera natural. Pero si en cambio, la modificación introducida en la bacteria apuntara a la producción de un biocombustible, tal rasgo resulta completamente ajeno a la historia evolutiva del organismo y diverge radicalmente de sus funciones naturales. En conclusión, de acuerdo al criterio de las propiedades homeostáticas, ciertas intervenciones de la biología sintética excluirían a los organismos modificados de su condición de objetos naturales. Finalmente, un tercer criterio, aún menos estricto que los dos anteriores y designado como *realismo promiscuo*, sostiene una suerte de pluralismo ontológico y acepta que el establecimiento de clases entre los objetos naturales es de tipo contextual y pragmático. La pertenencia o no de un objeto o un organismo a una clase natural sería, antes que un rasgo esencial del organismo mismo, una prerrogativa de la comunidad específica que estudia esas entidades, acorde con sus principios epistémicos y sus prácticas metodológicas. De acuerdo con este criterio, todos los productos creados por la biología sintética podrían ser considerados como miembros de una clase nueva o particular de objetos naturales, precisamente por tratarse de organismos vivientes que comparten entre ellos procesos de modificación intencional muy sofisticados, establecidos sobre el nivel molecular y basados en principios ingenieriles. En conclusión, para Schwyter los productos de la biología sintética no exhiben una categoría ontológica clara y desprovista de tensiones, producto tanto de su diferencia con los artefactos tecnológicos prototípicos como del grado de modificación de sus funciones biológicas naturales (Schwyter, 2012).

2.4. Bioartefactos

De acuerdo con el Programa Dual sobre la naturaleza de los artefactos, los objetos tecnológicos son entidades materiales intervenidas por un agente humano. La intervención refleja la intención de asignar al objeto, mediante el diseño y el uso, una determinada función para así alcanzar ciertos objetivos (Kroes y Meijers, 2006). Pero los objetos físicos que cumplen con estas premisas no necesariamente están conformados de materia inerte. También los organismos vivientes son objetos físicos sujetos a la intervención intencional de agentes humanos. Las funciones biológicas de estos organismos reconocen entonces dos orígenes diferentes. Por una parte llevan a cabo de manera autónoma las funciones biológicas naturales, inmanentes a cualquier organismo viviente. Simultáneamente, son producto de acciones intencionales que le confieren funciones biológicas artefactuales. Esta clase de entes ha sido denominada artefactos bióticos o bioartefactos y aunque cierto lugar común tiende a relacionarlos con las producciones más sofisticadas de la biología molecular y la ingeniería genética, su existencia data de tiempos ancestrales (Lee, 2005; Parente, 2014; Cuevas Badallo, 2016). Pese a que han sido parte de la evolución de la cultura humana y a la singular complejidad de su función –natural e intencional corporizadas en un mismo ente– los bioartefactos ocupan un lugar todavía marginal en la filosofía de la técnica y en la discusión acerca de la naturaleza de los objetos tecnológicos (Parente, 2014).

Los bioartefactos surgen en el período Neolítico, cuando los humanos comienzan a seleccionar y domesticar plantas y animales. Repetida a través del tiempo por cientos de generaciones, este tipo de selección modificó progresivamente la carga genética de los organismos bajo domesticación y de esta forma introdujo en ellos cambios respecto a sus versiones en estado salvaje, donde los procesos de selección operaron de manera natural. A modo de ejemplo podemos referir distintas prácticas de selección y domesticación de plantas apropiadas para la alimentación. Lo mismo respecto a aquellas variedades de animales que proporcionaban alimento por la abundancia de su masa muscular o la duración prolongada de su período de lactancia. En rigor, la interacción del ser humano con plantas y animales se inicia en un tiempo aún anterior a los procesos de domesticación. Durante ese período existía un tipo de convivencia en el cual ciertos ejemplares individuales de plantas

y animales vivían o eran mantenidos próximos a grupos humanos con los que se hallaban acostumbrados entre sí, en un tipo de asociación mutuamente beneficiosa. A diferencia de la domesticación, donde ocurren cambios notables en los rasgos fenotípicos a nivel de la especie, estas prácticas reconocidas como *taming* y *plant husbandry* no modificaban los caracteres de los individuos los cuales permanecían mayormente similares a los de su contraparte salvaje (Murphy, 2007; Preston, 2013; Parente, 2014).

Ahora bien, los componentes natural e intencional de un organismo bajo domesticación no funcionan de manera independiente. Más bien conforman una unidad integrada e inseparable, ya que es precisamente algún tipo de rasgo de las funciones biológicas naturales, las que despiertan el interés del agente humano que practica la selección. Las funciones naturales son así captadas por los humanos para satisfacer un interés particular (Longy, 2009). El grado de imbricación entre los componentes natural y artificial que se conjuga en estos organismos nos conduce a formular una serie de interrogantes. ¿Se trata de seres que continúan siendo parte del mundo natural? ¿O bien las modificaciones introducidas en ellos por la agencia humana son suficientes para considerarlos una clase más de artefactos tecnológicos? ¿Cuál es, en definitiva, la naturaleza ontológica que mejor describe a estas entidades? Tal como refiere Parente (2014):

[...] la naturaleza de los bioartefectos no puede comprenderse completamente por analogía con los entes vivientes pero tampoco con el marco conceptual que explica el estatuto de los artefactos prototípicos. Ni el esquema explicativo autopoiético (por sí solo) ni el esquema de producción intencional (por sí solo) son suficientes para comprender su condición (p. 168).

De manera intuitiva, el dilema que introduce la naturaleza de las funciones biológicas en los organismos domesticados conduce a ser interpretado desde una óptica intencionalista. Esto se explica a partir del hecho innegable de que el modo de existencia de estos organismos está mediado por la intervención humana. Sin embargo, también puede ser interpretado desde un enfoque opuesto al intencionalismo, de tipo reproductivista. Veamos a dónde arriba cada uno de estos marcos de análisis cuando se aplican en forma estricta o “pura”.

Si se aplicara a los organismos domesticados una perspectiva inten-

cionalista basada en el concepto de autoría (Hilpinen, 1993), sería necesario identificar un autor específico, un plan de diseño detallado para la producción del organismo y alguna forma de evaluación final del producto obtenido. El argumento para establecer la artefactualidad en este caso podría estar fundado en un criterio de dependencia contrafáctica: de no mediar un autor identificable con la intención expresa de domesticar un organismo, los rasgos que este pudiera exhibir solo serían atribuibles a la simple deriva evolutiva natural. Sin embargo, una operación de estas características no es posible cuando nos referimos al proceso de domesticación tradicional mediante la práctica de la selección artificial. Antes que un autor único definido en los estrictos términos que demanda el marco intencionalista (Hilpinen, 1993; Thomasson, 2003), la domesticación es un proceso de agencia múltiple realizado durante varias generaciones por autores anónimos. Nadie en rigor habría estado en condiciones de establecer el momento de obtención de un producto final y definitivo para proceder a su evaluación. La domesticación tradicional era una práctica cultural que antes que un acto de creación puntual de un producto específico, más bien formaba parte de un modo de vida que se transmitía de generación en generación. Al no poder identificarse un autor ni un producto, un criterio intencionalista estricto puede atribuir tan solo una dependencia causal (pero no conceptual) de la intención humana en el proceso de domesticación. En consecuencia, una perspectiva ontológica fundamentada de manera estricta en el componente intencional –mirada que en algún sentido resulta ser predominante en el análisis filosófico de la técnica– conduciría a descartar la noción misma de bioartefacto e incluiría a los organismos intervenidos por la agencia humana en una categoría análoga a la de cualquier objeto natural animado (Parente, 2014).

En la vereda opuesta al intencionalismo, las teorías reproductivistas o naturalistas “fuertes” rechazan la existencia misma, o al menos la primacía, del componente intencional en la caracterización de la naturaleza de los organismos domesticados. La simple reproducción o “copia” de un atributo funcional exitoso en un organismo, por medio de los mecanismos de variación y selección natural, serían suficientes para explicar su presencia y permanencia en el mundo, más allá de cualquier selección intencional artificial practicada por un agente humano. La historia de la reproducción de una función exitosa quedaría reflejada en la persistencia de la misma en un linaje filogenético de organismos portadores

de esa función. Así como el intencionalismo se focaliza en los organismos como entes individuales en el presente, y busca identificar en cada una de sus funciones la huella específica de una acción intencional acabada, el reproductivismo se enfoca en los antecedentes de los organismos como parte de una población y busca identificar una historia reproductiva en un linaje de funciones análogas. Y para explicar la interacción entre los organismos domesticados y los agentes humanos, el reproductivismo estricto prescinde del componente intencional, o al menos no lo reconoce como un factor jerárquico, y recurre al concepto de coevolución. En todo caso, los linajes de los organismos domesticados y los del ser humano se hallan relacionados e influenciados entre sí y son en última instancia, la resultante de una serie de asociaciones beneficiosas mutuas que favorecieron su coevolución. La cultura humana se habría adaptado al consumo de carbohidratos y lactosa tanto como los cereales y las vacas se adaptaron a la cultura humana (Sperber, 2007). Si se sigue entonces un enfoque reproductivista estricto, no sería necesario recurrir a la categoría particular de bioartefacto para describir a los entes sometidos a procesos de domesticación. Como apunta Parente, “si se asume una perspectiva naturalista radical, de orientación reproductivista, no es relevante distinguir entre linajes artefactuales “puros”, biológicos “puros” y bioartefactuales, pues todos los linajes se hallan relacionados y condicionados en el marco de un proceso coevolutivo” (Parente, 2014: 169).

En conclusión, los bioartefectos exhiben una naturaleza compleja y singular que no alcanza a ser develada en marcos teóricos puramente intencionalistas o reproductivistas. En sus versiones más radicales ambas teorías coincidirían, si bien mediante vías argumentativas opuestas, en impugnar la noción misma de bioartefacto como una clase especial de artefactos. El intencionalismo por considerar que esta hipotética categoría quedaría absorbida dentro de los objetos naturales animados, y el reproductivismo por considerar que los entes biológicos se mantienen por sí mismos y en su deriva evolutiva reproducen los modelos mejor adaptados de manera independiente a la eventual intervención del agente humano.

El inicio de los vínculos entre animales, plantas y humanos comienza hace miles de años y durante su desarrollo es posible identificar distintos escenarios que pueden ser interpretados tanto desde lógicas de argumentación intencionalistas como reproductivistas. Por ejemplo, la producción de mayor cantidad y calidad de leche en las especies anima-

les o de nutrientes de reserva en las semillas de plantas puede explicarse desde una perspectiva intencionalista como producto de la agencia humana y la selección artificial. Pero también puede explicarse desde una perspectiva reproductivista, como un proceso inmanente en la naturaleza que conduce a la reproducción selectiva de los organismos mejor adaptados al ambiente. Ahora bien, aunque el concepto estricto de autoría no resulta aplicable a los procesos ancestrales de domesticación, si lo que se pretende es revelar la singularidad de este fenómeno resulta insoslayable reconocer en él un cierto grado de intervención intencional. La idea que se sostiene aquí es que el hecho de que no sea posible identificar un autor definido no necesariamente implica la ausencia de una acción intencional. Los linajes reproductivos de ciertas plantas y animales fueron efectivamente intervenidos de manera recurrente mediante la selección artificial. Así, estas especies quedaron incluidas en planes de acción más o menos deliberados con el objetivo principal, básico y concreto, de garantizar la alimentación.

El interrogante que surge a continuación es si ese nivel particular de intencionalidad desplegado en el proceso de domesticación es considerado suficiente para sostener la noción de bioartefacto⁸. En última instancia, se podría dar cuenta de la domesticación simplemente como un proceso más de acciones intencionales desplegadas sobre los orga-

⁸ Es posible identificar distintos tipos de intervención sobre los organismos vivientes que revelan diferentes grados de intencionalidad. Esta escala puede contribuir a iluminar rasgos propios de las prácticas de domesticación que justifiquen la reserva de la categoría de bioartefacto para los organismos que son producto de estas prácticas. Así, podríamos distinguir entre a) acciones selectivas de carácter no intencional, b) acciones intencionales de carácter contingente, c) acción intencional de carácter sistemático. En el caso a), la recolección de semillas de trigo que a la madurez no eran dispersadas y permanecían adheridas a la espiga, conformaba una acción selectiva pero sin carácter intencional. Las variedades mutantes de trigo que exhibían este rasgo facilitaban la tarea de recolección y de esta manera fueron seleccionadas preferencialmente aunque de manera “natural”, sin que en esa acción medie ninguna intención. El caso b) se ejemplifica a través de la caza de un animal salvaje. Esta acción sí denota una intención pero, aún siendo una práctica estabilizada mediante un cierto grado de repetición, la intencionalidad subyacente tiene un carácter contingente. En todo caso el animal ha sido solamente un medio o instrumento para la alimentación. Finalmente, un ejemplo del caso c) es el proceso sistemático de selección artificial de especies para el cultivo de plantas y la crianza de animales. La continuidad de esta práctica dio lugar a la modificación del fenotipo de estos organismos que conformarían el primer escalón dentro de la categoría de bioartefactos. Un análisis más detallado sobre los distintos grados de intencionalidad puede consultarse en B. Preston (2008); B. Preston (2013) y Parente (2014).

nismos vivientes, sin recurrir a la categoría especial de bioartefacto para su descripción. Parente (2014) argumenta acerca de la conveniencia de rescatar la categoría de bioartefacto para conservar en un marco distintivo los rasgos únicos que crean las acciones intencionales desplegadas sobre la dinámica inmanente de las entidades vivientes. Por una parte, este concepto daría cuenta de la complejidad y riqueza de la cultura material surgida de la convivencia ancestral entre distintas especies vivientes. Por otra parte, una suerte de negociación o síntesis conceptual entre las dos teorías permitiría reconocer en el proceso de domesticación el grado de coevolución y mutua influencia entre los organismos domesticados y los agentes intencionales. En ese sentido, es importante remarcar que no se trata de acciones intencionales concebidas en “estado puro” sino más bien en un contexto o nicho específico compartido por diferentes clases de organismos. Antes de remitir a una serie de actos intencionales aislados, ejecutados por el ser humano sobre un grupo de organismos, el concepto de bioartefacto contribuiría a iluminar un proceso, cuya dinámica está marcada por la coevolución de especies. En suma, las funciones de los bioartefectos, estabilizadas luego de milenios de domesticación, se interpretarían como la resultante de una interacción compleja con mutuas influencias que promovieron un proceso de coevolución entre distintas especies biológicas. Por un lado, las acciones intencionales que a través de la selección artificial crearon los nichos apropiados para la adaptación y el mantenimiento de las plantas y los animales domesticados. Y por otro lado, la propia adaptación humana a las características naturales propias de estas especies.

2.5. La ontología de los bioartefectos en el nivel molecular

Por su temprana emergencia en los albores de la civilización humana los organismos domesticados son un ejemplo característico y recurrente en el análisis ontológico de la artefactualidad en los seres vivos. Pero el universo de los bioartefectos no se restringe únicamente a esta clase de entidades. También quedan inscriptos bajo esta categoría las modernas producciones de la biotecnología molecular, como los organismos transgénicos y los aún incipientes logros de la biología sintética, si bien como ya fue mencionado, estos últimos son todavía —en su gran mayoría— proyectos antes que producciones efectivamente concretadas.

Es evidente que aún compartiendo la misma categoría ontológica,

existe una marcada diferencia en los procesos de producción de los organismos domesticados desde tiempos ancestrales y los relativamente recientes organismos modificados a través de las modernas técnicas de transgénesis. Los primeros son el resultado de prácticas artesanales, forjadas de manera empírica y con escaso o nulo conocimiento y control de los mecanismos causales del proceso. Las prácticas iniciales de selección no respondían a planes detallados de diseño y se sucedían de manera continua por generaciones, sin que existiera un producto que indicara el reconocimiento del objetivo trazado y la finalización del proceso. El organismo mismo conformaba la unidad de selección, la cual se efectuaba en base a los fenotipos observados. Como se mencionó en el apartado anterior, la función artefactual y la función natural conforman una unidad inescindible en este tipo de organismos. La intervención de los agentes humanos consistía en apropiarse de la función biológica, la cual devenía entonces en natural y artefactual de manera simultánea. Un ejemplo característico es la vaca Holstein: al ser seleccionada de manera repetida, la misma función natural de la lactancia es una función intendida y adquiere características artefactuales, tales como el volumen total de leche producido y la producción permanente sin interrupciones estacionales, entre otras (Parente, 2014; Cuevas Badallo, 2016).

En cambio, los organismos modificados genéticamente son producto de la puesta en práctica de un conocimiento con fundamento científico. El diseño y los planes de acción tienen un carácter sistemático y todo el proceso de construcción del organismo está sometido a un control riguroso. La unidad de selección en este caso se asienta en el nivel molecular. Aún cuando la función artefactual incorporada está integrada al metabolismo general del organismo, se trata de un mecanismo o vía metabólica claramente delimitado del resto de las funciones biológicas naturales: por ejemplo, un gen o un grupo de genes incorporados mediante técnicas de transgénesis. Tal sería el caso de la soja transgénica RR, donde esencialmente se ha incorporado un gen de origen bacteriano en la planta para hacerla resistente a un herbicida o la incorporación de una vía metabólica para la síntesis de artemisinina en la bacteria *Escherichia coli*, en el caso de un organismo modificado mediante técnicas de biología sintética. Este tipo de modificaciones no halladas en la naturaleza resultan ajenas a la trayectoria evolutiva de cualquier organismo y, en consecuencia, no forman parte de las llamadas funciones homeostáticas (Schyfter, 2011). En estos casos, a diferencia de los organismos do-

mesticados, las funciones naturales y artefactuales están bien delimitadas entre sí y no conforman una unidad inescindible.

Históricamente, es posible distinguir tres procesos diferentes de producción de bioartefactos (Lee, 2005): a) los procesos tradicionales de crianza de animales y cultivo de plantas, fundados en métodos esencialmente empíricos y practicados desde épocas ancestrales; b) procesos basados en técnicas de cruzamiento e hibridación mediante genética clásica mendeliana y biología molecular, desarrollados durante la mayor parte del siglo XX; c) procesos que emplean la tecnología del ADN recombinante y la ingeniería genética, empleados a partir de las últimas décadas del siglo XX. A este grupo se agregaría, como un cuarto proceso de generación de bioartefactos tentativamente diferente de los previamente definidos por Lee (2005), los bioartefactos construidos mediante las técnicas propias de la biología sintética, iniciada a comienzos del siglo XXI (Lewens, 2013; Linares-Salgado, 2018; Parente, 2018). Esta clasificación implica que el grado de bioartefactualidad está estrechamente relacionado con el nivel de conocimientos y de control de la agencia humana sobre el sistema biológico que se interviene. Si el dilema planteado por la imbricación de funciones naturales y artefactuales en los organismos domesticados deja entrever una serie de interrogantes respecto al grado de intencionalidad, en las producciones modernas de la biotecnología ese interrogante queda en buena medida despejado. Es ilógico dejar de reconocer los rasgos intencionales en productos cuya construcción requiere un grado de conocimiento y control tan estricto y riguroso.

Como vemos, a diferencia de los procesos tradicionales de domesticación de organismos, las producciones modernas de la biotecnología podrían alcanzar a cumplir las rigurosas condiciones impuestas por una teoría intencionalista fuerte para caracterizar a un objeto como artefacto; esto es, la identificación de un autor que actúa bajo un plan detallado para alcanzar un objetivo específico y que está en condiciones de evaluar el resultado del producto final obtenido (Hilpinen, 1993; Thomasson, 2003). Por otra parte, una lógica reproductivista exhibiría serias dificultades para explicar a las nuevas producciones biotecnológicas como un tipo de copia de organismos precedentes con una historia reproductiva propia. Es cierto que el evento de transgénesis en sí deja la mayor parte del genoma del organismo inalterado, en cuanto a que este conserva sin cambios las funciones biológicas autónomas que ya eran propias en la especie y mantiene una continuidad en las relaciones filogenéticas con

organismos de especies emparentadas. Más aún, una posición reproductivista fuerte podría argumentar que no es importante la naturaleza del agente externo que el linaje reproductivo debe sortear para persistir como tal. Estos agentes, que actúan como fuerza selectiva sobre el linaje, pueden incluir a seres humanos y a las acciones intencionales. Bajo esta lógica, independientemente del alto grado de conocimiento y control implicados, la trangénesis llevada a cabo por agentes humanos no sería considerada cualitativamente diferente respecto de las múltiples presiones positivas y negativas que el mismo ambiente introduce. Lo que importaría, en última instancia, es el éxito alcanzado por determinadas funciones copiadas o reproducidas históricamente que dan lugar al linaje de un organismo. Ahora bien, la inclusión de las producciones biotecnológicas bajo un enfoque reproductivista de este tipo subdeterminaría el conocimiento y el estricto grado de control alcanzados en las técnicas de transgénesis y en las transformaciones en el nivel molecular. La tecnología del ADN recombinante y la ingeniería genética implican el intercambio de porciones de ADN entre distintas especies y aún entre diferentes reinos del universo biológico. No resulta lógico incluir bajo una óptica reproductivista operaciones con semejante grado de complejidad. Esta omisión del conocimiento alcanzado se haría más evidente aún en el caso de un enfoque reproductivista aplicado sobre la biología sintética, donde la producción de funciones biológicas enteramente artificiales y sin existencia previa en la naturaleza, resalta en mayor medida la existencia de un agente intencional (Linares-Salgado, 2018). Parente (2014) señala estas dificultades en forma de interrogante:

¿Cómo comprender desde una interpretación exclusivamente reproductivista la emergencia de los organismos genéticamente modificados durante el siglo pasado? Del primer cerdo que es producto de una modificación a nivel genético, ¿podría decirse que es sencillamente un ejemplar “copiado” que se desprende sin más de la historia reproductiva de los cerdos criados en granjas? (p. 175).

Si en el proceso de producción de bioartefactos tradicionales, como es el caso de los organismos domesticados desde el Neolítico, resulta relevante considerar implicado un cierto grado de agencia humana (aunque impreciso desde el concepto de autoría fuerte de Hilpinen), este grado es mucho mayor en las producciones modernas de la biotecnología, donde los límites de la actitud intencional están claramente deli-

mitados. En esta clase de producciones sí encontramos una dependencia, no solo causal sino también conceptual de las intenciones humanas, ya que los criterios de autoría que demanda la teoría intencionalista son en buena medida satisfechos. El nivel de bioartefactualidad guarda entonces una correlación directa con el grado de control del agente intencional en los procesos de modificación de organismos.

El control de los organismos es uno de los focos centrales en el horizonte de la biología sintética, hasta el punto de que se ha llegado a establecer una analogía estrecha entre el funcionamiento de una máquina y un organismo viviente construido o modificado por un agente humano. Tal como lo refiere Schyfter (2011):

El ejercicio de un control racional a través de los principios de la ingeniería biológica –promoviendo el diseño intencional y sistemático– es el núcleo central de la biología sintética, un principio que sintetiza todas sus expectativas, que pone en práctica y que busca perfeccionar (p. 35).

Más aún, a partir de la complejidad y la autonomía que este tipo de producciones podría alcanzar, se ha propuesto que la clásica dicotomía entre naturaleza y artificio para diferenciar entre los objetos producidos por la naturaleza o por la técnica se desplace hacia una nueva distinción, al interior mismo del universo de la técnica. La nueva divisoria estaría dada por las producciones susceptibles de ser mantenidas bajo control técnico y aquellas donde este control no sea posible de garantizar (Linares Salgado y González Valerio, 2016). Es pertinente entonces formularse los siguientes interrogantes: ¿hasta qué punto es posible extender esa analogía entre máquinas y organismos? ¿Es posible llegar a un grado de control tan estricto sobre un organismo vivo, de manera que este sea equiparado con el funcionamiento de una máquina?⁹

⁹ La equiparación del funcionamiento de un organismo al de una máquina, como pretende la biología sintética, no es algo novedoso sino que tiene un antecedente en el discurso filosófico mecanicista de hace 300 años. En los siglos XVII y XVIII el marco epistémico para el estudio del funcionamiento de lo viviente era la asimilación del cuerpo con la máquina. Descartes y luego también La Mettrie interpretaban la anatomía y la fisiología de los organismos animales bajo las leyes de la mecánica (Sibilia, 2005). El enfoque de lo viviente asociado a una concepción maquina primó hasta comienzos del siglo XIX en que aparece la biología como ciencia específica para el estudio de la vida. Cuando esto ocurre, la relación se invierte y entonces lo viviente, asociado ahora con lo natural, pasa a tener entidad propia, separada del mundo artificial de las máquinas. La vida se vuelve un fenómeno

2.6. El control sobre las entidades vivientes

Tal como lo manifiestan sus creadores, *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn3.0 es un organismo unicelular capaz de sobrevivir con una dotación mínima de genes en las condiciones óptimas de un laboratorio. Estas condiciones son bastante diferentes a las presiones de un medio natural, el cual probablemente demandaría el funcionamiento de varios genes adicionales (Hutchison III, *et al.*, 2016). Un genoma mínimo no es un concepto que puede ser considerado en términos absolutos; de hecho ningún genoma está determinado en sí mismo. Es la complejidad del contexto medioambiental en que un organismo desarrolla su programa vital lo que va a determinar, en última instancia, el concepto de genoma mínimo. En otras palabras, no existe un genoma mínimo patrón que pueda ser considerado como tal. Los genes no determinan los caracteres por sí mismos; más bien lo hacen en relación a factores epigenéticos y a un cierto contexto ambiental.

Más aún, los organismos vivientes expresan ciertas propiedades, designadas como propiedades emergentes, término acuñado por HG Lewes en 1875, que no pueden ser inferidas a partir de la simple suma o diferencia de las partes que componen un sistema (Porcar y Peretó, 2014). Este concepto pone en crisis la concepción de la materia viviente como la resultante del acoplamiento de una serie de partes modulares y desafía el propósito de la biología sintética de controlar un organismo de forma análoga al control que se ejerce sobre el funcionamiento de una máquina. En relación a las propiedades emergentes, los ingenieros metabólicos Manuel Porcar y Juli Peretó expresan “Este es un ejemplo muy claro de cómo la complejidad biológica es un obstáculo para la ingeniería de los seres vivos” (Porcar y Peretó, 2014: 4). El problema no es la ingeniería en sí misma, sino la pretensión de ejercer un control estricto de las funciones de un organismo cuando este es concebido como un producto enteramente ingenieril.

independiente de lo artificial, lo cual queda ahora subsumido en lo natural, como un producto de lo humano (Keller, 2002). En la segunda mitad del siglo XIX la filosofía de la tecnología de Ernst Kapp completa este giro. Para Kapp, a la inversa del modelo cartesiano, los instrumentos y también las creaciones culturales y sociales son un reflejo o mimesis de los diferentes órganos y sistemas del cuerpo humano (Mitcham, 1989). Es importante aclarar que Kapp no creía que este reflejo de la naturaleza en la técnica fuese un proceso deliberado, sino que le atribuía un carácter de acción inconsciente.

La complejidad, la adaptabilidad y la flexibilidad son características propias de los organismos vivos que se manifiestan cuando estos enfrentan escenarios nuevos, en respuesta a los cambios que el contexto ambiental impone al metabolismo celular. Estos rasgos responden al concepto de las propiedades emergentes a las que se refería Lewes. En la era posgenómica, con el surgimiento de disciplinas de carácter holístico como la biología de sistemas, se ha vuelto evidente que muchas de las premisas o certezas acerca de los comportamientos de ciertos sistemas biológicos aparecen ahora como demasiado simplistas. Por ejemplo, la idea de que las enzimas, proteínas que actúan como catalizadores de las reacciones biológicas, son estrictamente específicas para una sola reacción o que las proteínas cumplen una única función (Copley, 2017). Una manifestación en el nivel molecular acerca de la improbabilidad de predecir de manera estricta el comportamiento de un organismo es la llamada *promiscuidad* que exhiben las proteínas. La promiscuidad se refiere a las funciones secundarias, descubiertas en un número creciente de proteínas conocidas, y que son diferentes a la función “normal” o específica en base a la cual han sido seleccionadas en su trayectoria evolutiva. Estas funciones secundarias pueden tornarse relevantes para la sobrevivencia de un organismo cuando opera un cambio en el contexto ambiental (Nobeli, Favia y Thornton, 2009). La forma en que plantea operar la biología sintética, a través del agregado de diferentes partes biológicas modulares sobre un chasis o plataforma (Hutchison III, *et al.*, 2016), no permitiría descartar de antemano la aparición de nuevas propiedades o funciones secundarias *promiscuas* en un sistema biológico de tales características. Estas funciones podrían haber sido desconocidas o haber estado veladas hasta entonces, simplemente por no haberse expresado con anterioridad en el contexto natural donde las diferentes partes biológicas han evolucionado. Es posible y lógico concluir entonces, que aún cuando los más entusiastas propulsores de la biología sintética hagan énfasis en un grado de control estricto sobre los sistemas biológicos, la propia naturaleza de estos sistemas guarde un nivel de indeterminación que escape a ese control, y en consecuencia, establezca un límite a las analogías entre máquinas y organismos (Porcar y Peretó, 2014; Parente, 2018)¹⁰.

¹⁰ Por cierto este no es el único nivel de indeterminación al que está sujeta la biología sintética. Las producciones de la biología sintética, en tanto artefactos tecnológicos o bioartefactos, estarán sujetas a un nivel de indeterminación social adicional a la indeterminación inmanente a los sistemas biológicos. Las concepciones instrumentalistas en

Hay un rasgo notable que emerge a partir de las definiciones fundantes y las características singulares de la biología sintética como nueva disciplina. La materia viviente no es considerada como un todo o unidad integral sino más bien como una diversidad de fragmentos, los cuales pueden ser combinados entre sí de formas variadas para obtener diferentes funciones. Esta modularización puede ser comparada con la estructura funcional de una computadora donde a un núcleo central se agregan diferentes módulos o *chips* que le confieren nuevas funciones (Morange, 2009a). En la concepción tradicional de la biología molecular, la vida es un sistema formado por distintas partes indisociables, cuyo núcleo es la información contenida en la molécula de ADN. En contraste, la visión ingenieril que sostiene la biología sintética, plantea una deslocalización respecto a un centro único. La vida puede ahora ser armada o desarmada en módulos de ADN que pueden ser localizados en distintos tipos de chasis (Rodríguez, 2016).

2.6.1. *¿Es la biología sintética una novedad radical de la biotecnología?*

¿Es un fenómeno revolucionario y absolutamente novedoso la biología sintética? Su discurso entusiasta y en ocasiones inflamado, ¿es solo una moda o estamos ante hechos y producciones concretas, radicalmente diferentes respecto a las producciones biotecnológicas previas?

Con argumentos similares a los esgrimidos por Beth Preston (2008) (cap. 1, p. 49), Tim Lewens afirma que la biología sintética representa un grado más de evolución en la intervención humana sobre los organismos, sin llegar a constituir una transformación radical o una fractura de las divisorias tradicionales entre naturaleza y arteificio o máquina y

tecnología argumentan que un objeto tecnológico queda completamente determinado en la etapa de diseño, cuando es concebido por los expertos en base a criterios de máxima eficiencia funcional (Feng y Feenberg, 2008). Por el contrario, la teoría crítica sostiene que el diseño de un artefacto tecnológico siempre estará sometido a un nivel de indeterminación impuesto por las restricciones del contexto social, las cuales se revelan como condicionantes para la fase de aplicación o puesta en práctica del objeto en cuestión. Los rasgos que definen a un sistema biológico, complejidad, adaptabilidad y flexibilidad también son característicos del fenómeno tecnológico. Como veremos más adelante, la tecnología de la biología sintética y los biocombustibles de avanzada que de ella pueden esperarse, estarán fuertemente condicionados por este tipo de restricciones que Feenberg designa como niveles de instrumentalización de los artefactos tecnológicos (Feenberg, 2008; Carolan, 2010; Mackenzie, 2013).

organismo (Lewens, 2013). Este autor introduce la noción de *continuum design* –un continuo en el diseño– para referirse a los diferentes grados de intervención humana en el mundo viviente. En un polo de ese continuo se sitúa el largo proceso de interacción de los agentes humanos con plantas y animales, seguido luego por los procesos de domesticación. Inicialmente la selección de especies ocurría de manera natural, mediante la “modificación ciega” o inconsciente, o bien se trataba de una selección consciente pero sin que en ella mediara ninguna alternativa de tipo intencional. A partir del período Neolítico comienza una transición en la cual la selección, efectuada sobre la base de la apariencia fenotípica, adquiere una forma más consciente y deliberada. Como ya se ha apuntado, en esta etapa, el conocimiento que guiaba las acciones de intervención sobre plantas y animales era de un carácter esencialmente intuitivo, con escaso control sobre el desarrollo del proceso. De manera progresiva, los criterios de selección se volvieron más rigurosos y se apoyaron en supuestos racionales cada vez más sólidos y con base científica. Los cruzamientos basados en la genética mendeliana, el desarrollo de líneas puras para obtener vigor híbrido, la ingeniería genética y el surgimiento de la biotecnología moderna representarían ejemplos de distintas estaciones del *continuum*. El grado de conocimiento se fundamenta primero en el nivel de organismo, luego en el nivel celular y finalmente alcanza el nivel molecular (Lee, 2005; Parente, 2018). En el polo opuesto del *continuum*, Lewens sitúa a la biología sintética, la cual supone un nivel de intervención sobre los organismos aún mayor que el alcanzado con las más sofisticadas prácticas biotecnológicas de las últimas décadas del siglo XX. En esta etapa el conocimiento científico y el desarrollo tecnológico permiten el diseño sistemático y la posibilidad de fabricar *de novo* buena parte de las moléculas que conforman los organismos vivientes (si bien no es posible aún, como se analizó en el Capítulo I construir *enteramente* un organismo viviente). En concreto, se puede afirmar que lo novedoso de la biología sintética se funda en varios factores: a) una capacidad inédita para generar, almacenar y procesar datos de secuencias de ADN; b) el diseño sistemático de buena parte de los módulos que componen un sistema viviente elemental, como una bacteria; c) la posibilidad de sintetizar, ensamblar y clonar en vectores apropiados secuencias del orden del millón de pares de bases, con un grado de control muy alto sobre todos estos procesos; y d) la velocidad para generar distintas variantes de estas moléculas y sistemas, potencial-

mente mucho mayor aún que la de los procesos evolutivos naturales (Morange, 2009a; Morange, 2009b).

Considerando todo el potencial científico y técnico enumerado en el párrafo anterior, es lógico preguntarse acerca de las cualidades que debiera reunir un organismo artificial producido mediante biología sintética para que la disciplina sea considerada efectivamente capaz de producir un “quiebre ontológico” como argumentan Baker (2008) y Christopher Preston (2008) (cap. I, pp. 47 y 48). Para transformar de manera radical nuestro concepto actual de lo que significa una entidad viviente, debiera ser posible crear un organismo que responda a los cambios ambientales de acuerdo a formas previamente programadas. Si se lograran reunir estas condiciones, estaríamos frente a una auténtica máquina viviente. Sin embargo, la esencia misma de la vida es el cambio constante y la plasticidad frente a los desafíos del medio ambiente, en clara oposición al carácter fijo propio de las máquinas. Este hipotético organismo se situaría, entonces, más allá del límite de lo que actualmente conocemos como entidad viviente. Por el momento, un organismo de esta naturaleza constituye una imposibilidad conceptual, ya que por definición una entidad viviente escapa al nivel de control externo al que están sometidas las máquinas y mantiene siempre, como un rasgo peculiar, su propia normatividad. Los organismos vivientes revisten tal condición porque se rigen por una normatividad intrínseca mientras que la característica de las máquinas es que responden a una normatividad extrínseca (Porcar y Peretó, 2014; Parente, 2018).

Finalmente, en línea con Keller (2009) y Mackenzie (2013), Beth Preston (2013) argumenta que tampoco en el terreno epistémico la biología sintética es portadora de algo radicalmente nuevo. Los fundamentos generales de la ingeniería que la biología sintética hace suyos para la construcción de organismos vivos, esto es, la *estandarización*, la *modularización* y la *abstracción*, son para esta autora atributos cognitivos generales propios de la especie humana. Como tales, comienzan a ponerse en práctica en el período Neolítico, como parte de las tecnologías más sencillas aplicadas a la agricultura, la metalurgia, la construcción de viviendas, la tejeduría y la alfarería. Si bien su aplicación rigurosa en organismos biológicos depende de los avances más recientes de la ciencia y la tecnología modernas, los fundamentos conceptuales de estas prácticas ya están presentes en los comienzos mismos de la civilización humana, cuando se inicia la domesticación de plantas y animales (Preston, 2013).

En resumen, no obstante su enorme potencialidad, no existen argumentos acabados para considerar que la biología sintética escapa al continuo de intervenciones del agente humano sobre los organismos vivos. Es evidente que la biología sintética implica un control más sofisticado y cuantitativamente mayor sobre la materia viva que las técnicas biotecnológicas precedentes. No obstante, estos atributos singulares no alcanzarían a modificar de manera sustantiva el concepto de organismo, como una entidad que en última instancia responde a su propia normatividad y control interno. La biología sintética, al menos hasta ahora, no implica un quiebre ontológico ni una ruptura total de las diferencias entre las entidades naturales y artificiales.

Ahora bien, aunque la biología sintética no implique una novedad radical desde el punto de vista ontológico y conforme un eslabón más de un continuo de intervenciones humanas sobre los organismos —cuyos orígenes, como hemos analizado previamente, remiten a tiempos ancestrales—, resulta evidente que el nivel alcanzado en el conocimiento y el control sobre la materia viva han definido un nuevo tipo de bioartefactualidad. Asimismo, los bioartefactos contemporáneos se han convertido en un nuevo tipo mercancía y en un bien de capital que se han adaptado a múltiples aplicaciones industriales (Linares Salgado, 2018). En los capítulos siguientes analizaremos un conjunto de factores de naturaleza sociotécnica que influyen y condicionan el proceso de diseño de bioartefactos, en tanto objetos tecnológicos. Aunque no se encuentren expresamente explicitados, esta dimensión normativa de la tecnología es lo que Feenberg llama código técnico (Feenberg, 2005). En el Capítulo III nos enfocaremos en profundizar los conceptos de diseño y código técnico y los procesos sociales mediante los cuales los objetos naturales son instrumentalizados como objetos tecnológicos. Luego, en el Capítulo IV nos remitiremos a un estudio de caso particular: las producciones actuales y los proyectos de la biología sintética relacionados con la obtención de biocombustibles desde la perspectiva de la teoría crítica de la tecnología.

Capítulo III. Los fundamentos de la teoría crítica de la tecnología

3.1. La concepción de la tecnología en la teoría crítica de Andrew Feenberg

En las sociedades modernas la tecnología es un fenómeno omnipresente. Todos los aspectos materiales, económicos, políticos y culturales que son parte de nuestra vida en sociedad están mediados por la tecnología. Dada esta relación tan estrecha, es lógico preguntarse acerca de la naturaleza del vínculo que existe entre tecnología y sociedad. Esta pregunta es clave para entender el concepto de tecnología en la filosofía de Andrew Feenberg¹. Para Feenberg la tecnología no es una esfera indepen-

¹ Andrew Feenberg es una de la figuras más relevantes de las últimas décadas en el campo de la filosofía de la tecnología. Su obra reconoce vertientes fundamentales en la Teoría marxista del proceso de trabajo, la Fenomenología de Heidegger, la Teoría Crítica de la Escuela de Frankfurt y los Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología. Feenberg ha integrado estas tradiciones intelectuales en una teoría crítica que revela la naturaleza sesgada de la tecnología contemporánea y los fundamentos para su transformación democrática, a través de la participación ciudadana en el debate público y la resistencia social organizada. Estudió con Lucien Goldmann y Herbert Marcuse con quien se doctoró en 1973 en San Diego, California, con el trabajo de tesis *The Dialectics of Theory and Practice*. Su primer libro fue *Lukács, Marx and the Sources of Critical Theory*, publicado en 1981 y luego reexaminado y publicado en 2014 como *Philosophy of Praxis*. Allí explora la obra filosófica de Marx y Lukács, revelando el paralelismo entre los conceptos de alienación y reificación y la similitud en las conclusiones a las que arriban ambos autores. En *Critical Theory of Technology* (1991), *Alternative Modernity* (1995) y *Questioning Technology* (1999) Feenberg aborda el problema de la tecnología y revela a esta como un componente fundamental de la racionalidad social del capitalismo. Otras de sus obras fundamentales son *Heidegger and Marcuse: The Catastrophe and Redemption of History* (2005), *Between Reason and Experience: Essays in Technology and Modernity* (2010) y *Technosystem: The Social Life of Reason* (2017). *Critical Theory of Technology* fue reeditado como *Transforming Technology* en 2002 y cuenta con una traducción al castellano titulada *Transformar la Tecnología* (2012) editada por la Universidad Nacional de Quilmes. Feenberg ha ense-

diente, un exterior que se genera por fuera de la sociedad, regido por sus propias leyes, y que luego irrumpe e impregna todos los ámbitos de la vida social. Más bien, la tecnología nace desde el interior mismo y es un fiel reflejo de la estructura y la dinámica social. Por ello, desde sus mismos fundamentos y prácticas, la tecnología está atravesada por lo político y es un campo más de expresión de la disputa política. La dinámica que asume esa disputa es, por un lado, el intento de aquellos que ostentan una posición dominante en la sociedad de imponer sus propios modos y patrones tecnológicos. De esta forma, a través de la tecnología, consolidan su posición jerárquica y de control sobre las mayorías. Como contrapartida, los grupos dominados pueden resistir a ese dominio y luchar por reivindicaciones que garanticen un acceso a mayores derechos y a un mayor control de la tecnología. El terreno de esta disputa política no se restringe únicamente a las reacciones suscitadas por las consecuencias adversas de la aplicación de una cierta tecnología. Comienza a manifestarse, aunque de manera menos evidente, en una etapa anterior, durante el mismo proceso de diseño de los artefactos y de los procedimientos técnicos que conforman y median nuestra relación con el mundo. A este antagonismo dialéctico que opera como un motor en el devenir de la tecnología, Feenberg lo llama la ambivalencia de la tecnología (Feenberg, 1999: 7; Feenberg, 2002: 15). Por una parte, un movimiento que trata de conservar y reproducir en las innovaciones tecnológicas una posición jerárquica. En la vereda opuesta, un movimiento que tiende a enfrentar esas iniciativas y reclama otra clase de tecnología que se adapte a sus necesidades (Feenberg, 1999). En síntesis, el núcleo de la teoría crítica de Feenberg reside en el contenido político del desarrollo tecnológico. Una consecuencia importante que surge de esta caracterización es que la tecnología no puede explicarse entonces desde la estricta racionalidad de las leyes científicas. Más allá de que los conocimientos científicos y técnicos sean un componente importante y formen parte, desde luego, de la propia naturaleza de la tecnología, no son factores que determinan a la tecnología.

Ahora bien, esta visión política que ve en la tecnología un emer-

ñado durante muchos años en el Departamento de Filosofía de la Universidad de San Diego y en varias otras universidades de Estados Unidos, Francia, Japón y Brasil. Actualmente se desempeña en la Escuela de Comunicación de la *Simon Fraser University* en Vancouver, Canadá. La página *web* personal del autor puede consultarse en <https://www.sfu.ca/~andrewf/index.html>

gente de la vida social no es necesariamente la única mirada. Otras teorías que más adelante serán expuestas en detalle, sí conciben la tecnología como una dimensión separada y autónoma, cuyas leyes de desarrollo interno son independientes de aquellas otras que modelan las sociedades humanas. Bajo esta concepción, el desarrollo tecnológico se ubica en un lugar jerárquico respecto a los otros espacios que componen la vida social. Más aún, la influencia y los condicionamientos que la tecnología impone en la sociedad, a través de los “imperativos tecnológicos”, resultan entonces inevitables e imposibles de soslayar.

La diferencia en las visiones sobre el tipo de relación que se establece entre la tecnología y la sociedad abre una discusión en torno a la naturaleza y el alcance de la acción humana en los sistemas técnicos. Si la tecnología es una fuerza autónoma y constituye una esfera independiente de la vida social, entonces la acción humana solo puede, en el mejor de los casos, aminorar los efectos negativos derivados de su aplicación. Una posición diferente, y sin duda mucho más radical, podría eventualmente optar por una renuncia a la tecnología. Una suerte de regreso a una época premoderna regida por valores tradicionales y con un rechazo expreso de cualquier cambio que tienda a modificar esos valores.

Por el contrario, si la tecnología es modelada a partir de la dinámica social estará entonces expuesta a controversias y modificaciones, de la misma manera que lo están la economía, la política y la cultura en general (Feenberg, 1999). La valoración de la tecnología que hace la teoría crítica deja abierta la posibilidad de la agencia humana para decidir la dirección del desarrollo tecnológico. Ahora bien, si el límite de la agencia se restringe simplemente a paliar o corregir las consecuencias adversas de las aplicaciones de la tecnología, los efectos negativos podrán ser atenuados o adquirir un “rostro humano” pero no será posible una transformación de la tecnología. Para que ocurra un cambio cualitativo en la dirección del desarrollo tecnológico es necesario que la agencia se extienda al interior mismo de la tecnología, alcanzando al campo del diseño. La teoría crítica sostiene que el diseño de los sistemas técnicos contiene un sesgo ideológico que refleja el orden social. Consecuentemente, y dado el carácter ubicuo de la tecnología, la disputa política alrededor del diseño de los sistemas técnicos abre la posibilidad concreta de la democratización de una parte fundamental de la vida social.

Feenberg sostiene que la tecnología y la sociedad están entrelazadas de tal modo que ambas están coproducidas mutuamente (Feenberg,

2017b: 9-10). Para representar esta relación recurre a la famosa litografía *Drawing hands* del artista holandés Maurits Cornelis Escher, en la que dos manos se dibujan mutuamente entre sí. En palabras del propio Feenberg (2017b):

... la sociedad y la tecnología están intrincadamente unidas. Los grupos sociales se conforman a través de las tecnologías que unen a sus miembros. En la litografía de Escher, estos grupos se representan por la mano dibujada. Pero una vez que los miembros se unen, hay un empoderamiento sobre las tecnologías y entonces toman el lugar de la mano que dibuja. Formados y conscientes de su identidad, los grupos que están mediados tecnológicamente influyen en el diseño tecnológico a través de sus elecciones y sus demandas (p. 9).

En esta representación la tecnología no ocupa un lugar jerárquico y queda expuesta a una modificación democrática, forjada a través de las demandas de los múltiples grupos sociales cuyos lazos personales y materiales se articulan a través de la tecnología.

3.2. Las teorías de la Tecnología

Feenberg elabora una clasificación de las diferentes concepciones sobre la tecnología, basada fundamentalmente en su dimensión axiológica y en el lugar que se confiere a la agencia humana para intervenir en el desarrollo tecnológico. Establece una primera división entre una teoría instrumental y una teoría sustantivista de la tecnología. Ensayo a su vez una diferenciación de estas dos visiones postulando una tercera alternativa a la que llama Teoría Crítica de la Tecnología (Feenberg, 2002). En las secciones siguientes se desarrollan las características principales de estas tres teorías.

3.2.1. Teoría instrumental

En la teoría instrumental, los sistemas técnicos están planteados como medios o herramientas para el cumplimiento de objetivos. Por lo tanto, en este marco la tecnología es planteada como un mero instrumento y como tal, es un fenómeno neutral sin carga valorativa propia. Feenberg recurre a los ejemplos más elocuentes para describir el instrumentalismo: “un martillo es un martillo, una turbina es una turbina” (Feenberg,

2002: 6). Lo mismo cuenta para una tecnología más reciente y sofisticada; una computadora no es más que eso mismo, sin mayores implicancias. Por lo tanto para el instrumentalismo, la producción y los modos de uso de los artefactos son facetas independientes del contexto social o del sistema político imperante. El valor de los artefactos como instrumentos es un concepto que forma parte de un sentido común generalizado y resulta evidente por sí mismo, sin que sea necesaria ninguna justificación adicional. Antes que abundar en un sólido desarrollo teórico, el instrumentalismo se presenta como una suerte de cuestión práctica. La visión instrumental de la tecnología ofrece una perspectiva cuya comprensión tiende a ser inmediata, ya que no propone mayor reflexión en torno a la complejidad del fenómeno tecnológico. La trama de factores implicados en la imaginación, el diseño y la construcción de un objeto tecnológico son consideradas instancias puramente técnicas.

Al ser sencilla de comprender e intuitiva, la teoría instrumental es la concepción predominante acerca de la tecnología. Es en su lógica crasa, elemental y en principio irrefutable, donde radica la fuerza de los argumentos de la teoría instrumental. Ciertamente es muy difícil apreciar en un martillo una carga ideológica. Más adelante, en este trabajo se aborda en mayor detalle la cuestión de la neutralidad de las herramientas y piezas básicas a partir del concepto de Feenberg de elementos técnicos, definición que alcanza a un martillo. Una de las claves de la aceptación generalizada de la teoría instrumental radica en que la observación de un artefacto tecnológico en forma aislada no puede conducir a otra conclusión que a su neutralidad. Las cualidades intrínsecas del martillo o de cualquier otro artefacto, independientemente de su complejidad, efectivamente no varían en cualquier contexto social que se considere. Ocurre que el concepto de tecnología en la teoría instrumental, se limita al artefacto en sí y a su función, excluyendo deliberadamente cualquier consideración acerca de la relación de ese artefacto con el mundo (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002).

El instrumentalismo acepta el hecho de que la tecnología está asociada a múltiples situaciones con connotaciones positivas o negativas. Pero en todo caso, estas son consecuencias del uso o aplicación particular que se haga de un determinado artefacto o tecnología y no de ella en sí misma. En la teoría instrumental los medios y los fines son dos esferas diferentes y están completamente separados una de la otra. Esta separación estricta da lugar a que el diseño de los objetos tecnológicos sea re-

gido exclusivamente por valores técnicos como la eficiencia, el control y el rendimiento. Los medios, es decir los productos de la tecnología, son la resultante natural de la aplicación de esos valores. Otra cuestión diferente son los fines, es decir la aplicación de la tecnología. Esta dependerá enteramente de las intenciones del ser humano. Por eso, la concepción instrumentalista considera que la tecnología, en última instancia, está determinada por las motivaciones de quienes son responsables de aplicar o poner en práctica los desarrollos tecnológicos.

La lógica de la teoría instrumental tiene como sostén fundamental y justificativo último a la ciencia. El arraigo de la teoría instrumental en estamentos muy diversos de la sociedad expresa un “sentido común”, una suerte de simplificación o creencia que puede resumirse en la siguiente idea: la tecnología es un complemento accesorio de la ciencia. La ciencia genera conocimientos y la tecnología los transforma en aplicaciones útiles. Como producto derivado del conocimiento científico, la tecnología está asociada con una suerte de “verdad objetiva” y también con la idea de progreso. Por ello, más allá de sus eventuales efectos negativos, su legitimidad está mayormente fuera de discusión. La tecnología queda así a resguardo de la crítica con un argumento inveterado: se trata de la aplicación de principios o leyes objetivas surgidas a partir del conocimiento científico.

La categoría de objetividad y verdad indiscutible que revisten la ciencia y la tecnología proporciona una vía elemental y rápida para desacreditar cualquier objeción contra ellas. Basta con calificar cualquier argumento crítico como irracional para así lograr desplazarlo por fuera de lo que se considera la verdad. El carácter neutral y puramente instrumental de la tecnología puede considerarse entonces como una derivación del hecho de considerar la ciencia como relato o representación objetiva del mundo (Feenberg, 2002).

La paradoja del instrumentalismo es que la definición de la tecnología como un fenómeno neutral no es en sí misma neutral. Si en la teoría instrumental la tecnología es nada más que una herramienta, luego la política es un campo completamente ajeno a la naturaleza de la tecnología (aunque no a su aplicación, como se mencionó más arriba). Para la teoría crítica, el instrumentalismo funciona entonces como un velo que contribuye a ocultar el sesgo incluido en el diseño. Conviene remarcar el significado de la ausencia de la política en la concepción instrumentalista. Al presentarse a la tecnología como un simple recurso

asociado al progreso material de la humanidad, el debate público queda naturalmente desplazado de este ámbito. En todo caso, la perspectiva instrumental indica que lo pertinente es que ese debate, siendo de naturaleza estrictamente técnica, quede en manos de los expertos. Sin embargo, el diseño de las vías de acceso a ciertas áreas de una ciudad que solo permitan el paso de automóviles particulares y no de transporte público (Feenberg, 1999: 80) o, en una dimensión diferente, el diseño de una planta modificada genéticamente, cuyo cultivo ponga en riesgo la salud de vastos sectores de la población y la seguridad alimentaria y la diversidad biológica, son decisiones impregnadas de un claro sesgo político. Lo que la teoría crítica sostiene y se pretende enfatizar aquí, es que ese sesgo no está en la aplicación sino que tiene un origen anterior, en el diseño mismo de la tecnología. Lo que se posterga como consecuencia de reducir la tecnología a la categoría de mero instrumento, es el acceso público a las decisiones sobre el diseño y el tipo de tecnología que una comunidad puede querer darse a sí misma. El desarrollo tecnológico queda así subordinado a decisiones de carácter político y económico tomadas por grupos de poder. Por ejemplo, grandes corporaciones capaces de decidir qué y cómo se produce, en función de un interés o beneficio particular antes que público. Analizaremos más adelante que en la concepción instrumentalista, el ámbito de las decisiones en torno al diseño tecnológico está mayormente velado para el público. Los objetos tecnológicos son presentados a la sociedad en una etapa posterior al diseño, como hecho consumado, natural y lógico, producto de la aplicación de un concepto particular o unívoco acerca del significado de la eficiencia (Alexander, 2008). Este escenario es propio de una sociedad tecnocrática donde el debate público ha sido reemplazado por la autoridad de los expertos (Feenberg, 1999).

En resumen, el instrumentalismo es el predominio de una política de despolitización de la tecnología que inhibe el rol público en la discusión del diseño. La idea de la tecnología neutral, relacionada unívocamente con el progreso de la humanidad no es patrimonio exclusivo del capitalismo o de un *establishment* ideológico de corrientes conservadoras. También en el marxismo tradicional la tecnología no es cuestionada en sí misma sino que es considerada como un fenómeno objetivo y neutral, necesaria para el progreso social y material de la humanidad y para el dominio sobre la naturaleza (Feenberg, 1999; Feenberg, 2008).

3.2.2. Teoría sustantivista

El sustantivismo se apoya en un corpus teórico robusto, heredero de una tradición romántica iniciada en el siglo XIX que propugnaba el “fin de la mecanización” y un regreso a formas de producción artesanales, propias de la época premoderna (Feenberg, 1999; Feenberg, 2005). La teoría sustantivista (Feenberg también la llama esencialista) postula que la tecnología, lejos de ser neutral, está “cargada” de valores ideológicos que someten al ser humano. El sustantivismo caracteriza a la tecnología como una fuerza autónoma y dotada de una esencia negativa que es imposible de trascender. Los fenómenos sociales, económicos, culturales y en general todo aquello propio de la experiencia humana queda así sometido por el avance permanente de la tecnología. Para el sustantivismo la tecnología es un hecho fatal e irreductible que actúa como un condicionante absoluto de la esfera social. El “dominio técnico” se cierne sobre las sociedades contemporáneas como la causa última de todos los males propios de la Modernidad (Feenberg 1999; Feenberg, 2002).

A partir de mediados del siglo pasado, Jacques Ellul y Martin Heidegger se convierten en los exponentes más notorios de estas ideas. La crítica a la tecnología ensayada por Heidegger afirma que el cambio tecnológico ha producido una ruptura del equilibrio que existía entre el ser humano y la naturaleza en las sociedades tradicionales (Feenberg, 2011). Argumenta que la tecnología ha vuelto al humano un extraño en su propio mundo. Aboga por el regreso a tradiciones y ritos ancestrales de comunión con la naturaleza, perdidos en el transcurso de la Modernidad, para que el ser humano recupere su ser genuino. En *La pregunta sobre la Técnica*, Heidegger sostiene que cuando el hombre comprenda que la técnica no es un mero medio o instrumento entenderá entonces su verdadera esencia y podrá establecer con ella una relación libre, como existía en el pasado anterior a la modernidad (Heidegger, 1997: 113-148)².

² Para Heidegger, el ser humano descubre o se revela a sí el mundo en términos de recursos a explotar. “Por el contrario, una región es provocada a la extracción de carbón y minerales. La tierra se desoculta ahora como región carbonífera, el suelo como lugar de yacimiento de minerales. De otra manera aparece el campo, que el campesino antiguamente labraba, en donde labrar aún quiere decir: cuidar y cultivar. El hacer del campesino no provoca al campo. En el sembrar las simientes, abandona él la siembra a las fuerzas del crecimiento y cuida su germinación. Entretanto, la labranza del campo ha caído en la resaca de otro modo de labrar, que pone a la naturaleza. La pone en el sentido de provocación. El campo es ahora industria motorizada de la alimentación. El aire es puesto

En parte influenciados por el sustantivismo heideggeriano, Marcuse y Foucault también identificaron en la tecnología un auténtico dispositivo de poder. Para estos autores, las formas modernas de dominación no se dan mediante la opresión abierta sino más bien a través de formas encubiertas y esencialmente técnicas (Feenberg, 2002; Feenberg, 2017b). Sin embargo, ambos se diferencian del determinismo tecnológico duro de Ellul y Heidegger, en el sentido de que no consideran la tecnología como un poder autónomo y definitivo que no pueda ser modificado por la acción humana. Marcuse eleva la tecnología a la categoría de ideología orientada hacia el control de la vida humana y la naturaleza.

El concepto de razón técnica es quizá él mismo ideología. No sólo su aplicación sino que ya la técnica misma es dominio sobre la naturaleza y sobre los hombres: un dominio metódico, científico, calculado y calculante. No es que determinados fines e intereses de dominio sólo se advengan a la técnica a posteriori y desde fuera, sino que entran ya en la construcción del mismo aparato técnico (Marcuse (1965) “Industrialisierung und Kapitalismus im Werk Max Weber”, en *Kultur und Gesellschaft*. II, Frankfurt como se citó en Habermas, 1986: 55).

También David Noble relaciona a la técnica con la dominación política bajo una perspectiva esencialista. Considera a la ingeniería genética y a la realización del Proyecto Genoma Humano dentro de una lógica mesiánica de apoderamiento y modificación de lo viviente. Extiende esta visión a los principales científicos impulsores y directores del proyecto a quienes ve movilizados en su tarea por un fervor literalmente religioso. Su mirada negativa sobre la ingeniería genética y la biotecnología es radical y pareciera no dejar espacio para ninguna consideración

dentro de la entrega de nitrógeno, el suelo por los minerales; por ejemplo, el uranio, éste por la energía atómica, que puede ser desintegrada para destrucción o para usos pacíficos” (Heidegger, 1997: 123-124). El pensamiento de Heidegger respecto a la tecnología ha tenido fuerte influencia en grupos ecologistas y con una impronta general “tecnofóbica”. También ha sido caracterizado como elitista y alejado de las necesidades humanas cotidianas. Fernando Broncano remarca este sesgo en un pasaje del texto *Identidad y diferencia*: “las exigencias del ser son inhumanas, en el sentido de que las cosas humanas, tan humanas como el frío o el calor, no cuentan en el camino del destino del ser”. La crítica de Broncano se extiende al análisis de Heidegger en relación a cuestiones básicas como la vivienda. A este respecto el filósofo alemán dice que “la verdadera penuria, antes que la falta de viviendas radica en que el hombre debe encontrar primero la esencia del habitar” (Broncano, 2000: 68-70).

crítica que considere una transformación de esta tecnología bajo un control democrático (Noble, 1999).

En síntesis, la teoría sustantivista desestima el concepto puramente instrumental de la tecnología a la vez que enfatiza su carga ideológica y su poder para el control y el sometimiento de la vida humana. La tecnología es una fuerza autónoma que alberga en sí misma una esencia negativa. Es un hecho consumado, un destino establecido al cual no es posible modificar mediante la agencia humana.

3.2.3. *Teoría crítica de la tecnología*

La teoría crítica caracteriza a la tecnología como un fenómeno de naturaleza social³. Ya no se trata de la tecnología como un hecho consumado y prestablecido y como si fuera una dimensión apartada de la sociedad. De aquí que es posible una transformación política de la tecnología que, mediante el debate y la acción de las mayorías, imprima un sesgo democrático a la dirección del desarrollo tecnológico. Pero no se trata de una acción que solo prevenga los efectos adversos de las malas aplicaciones tecnológicas. La teoría crítica sostiene que esa transformación tiene su punto de partida en una etapa anterior, hacia el interior mismo de la tecnología, la etapa que concierne a la discusión del diseño tecnológico. Más aún, como fenómeno ubicuo y como un campo para la acción política, la transformación de la tecnología abre la posibilidad de una transformación democrática de alcance más vasto, que implique a amplios sectores de la sociedad y a la variedad de relaciones sociales que se establecen entre ellos.

Feenberg ensaya una crítica a las perspectivas instrumentalista y sustantivista, más allá que considere lógicos algunos aspectos puntuales de la primera perspectiva y acuerde con la idea básica del sustantivismo de considerar a la tecnología como un fenómeno desprovisto de neutralidad. Aunque el instrumentalismo y el sustantivismo exhiban características que aparecen visiblemente contrapuestas, Feenberg encuentra puntos de coincidencia entre las dos teorías. Ambas comparten una suerte de mirada fetichista de la tecnología, al concebirla como una dimensión exterior y jerárquica, regida por leyes propias y separada de la

³ En sus trabajos más recientes Feenberg también llama a su teoría crítica constructivismo crítico (Feenberg, 2017b; Feenberg, 2020).

vida social. Como consecuencia, las dos teorías excluyen el debate político en torno a la tecnología. Bien sea que se la subdetermine, relegándola a una categoría utilitaria de simple accesorio para la consecución de fines prácticos, o bien que se la sobredetermine, elevándola a la dimensión de condicionante absoluto de la cultura humana, en ambas concepciones la tecnología es objetivada como un hecho inmodificable; el sujeto público queda excluido *a priori* de toda capacidad de acción o agencia. La tecnología se revela como “un hecho dado” o como “la forma en que son las cosas” (Feenberg, 2002: 18). Frente a este escenario, cualquier postura de cuestionamiento al curso de la tecnología, desde la óptica del sustantivismo, se revela como algo imposible o condenado al fracaso de antemano. Igualmente, desde la mirada instrumental, cualquier crítica al desarrollo tecnológico aparece como romántica e irracional.

Una diferencia fundamental de la teoría crítica respecto al instrumentalismo radica en considerar que la tecnología nunca es neutra. La teoría crítica sostiene que la tecnología está cargada con valores que expresan los intereses de grupos sociales dominantes. El dominio de estos grupos sobre otros grupos subordinados se ejerce mediante los sistemas tecnológicos. No es posible entonces sostener que la tecnología es una simple herramienta neutral; más bien, en su expresión actual la tecnología es utilizada como herramienta para extender los mecanismos de dominación y control (Feenberg, 2002). Feenberg afirma la necesidad de cuestionar y debatir críticamente la orientación de la tecnología. Para ser genuinamente democrático, este debate debería estar sostenido por una amplia participación popular. Esta definición es crucial en cuanto a lo que singulariza a la teoría crítica: la tecnología no es un campo que debe restringirse únicamente al saber de los expertos, como argumenta el instrumentalismo; por el contrario, debe estar abierto al debate democrático de todos los sectores sociales implicados e interesados. En esta concepción, la decisión en torno a qué tecnología producir, cómo hacerlo y con qué objetivos queda sostenida entonces por una auténtica licencia social. No obstante, veremos más adelante que la teoría crítica rescata una parte lógica propia del instrumentalismo y reconoce efectivamente una condición de neutralidad en ciertos materiales elementales de la esfera técnica. Por otra parte, la teoría crítica reconoce cierta lógica de ideas y profundidad en la construcción teórica sustantivista que identifica a la tecnología como expresión de valores ideológicos y como factor de dominación (Feenberg, 1999). Pero la coincidencia entre ambas

teorías no trasciende más allá de este punto. La teoría crítica se aparta del argumento sustantivista que atribuye a la tecnología una esencia negativa, independiente de cualquier contexto histórico, económico y social. Rechaza la postura anti-tecnológica y la renuncia al debate y a la lucha política en torno a los límites y a las potencialidades que la tecnología pueda ofrecer. Sostiene que la visión sustantivista de la Modernidad asume el desarrollo de la tecnología como un hecho unívoco, imposible de ser modificado en su esencia, de manera similar a las leyes naturales que regulan el funcionamiento de universo. Esta concepción determinista no asume a la tecnología como algo contingente y susceptible de ser transformado, sino que la caracteriza como un fenómeno esencial y transhistórico. El sustantivismo asimila un tipo particular de desarrollo tecnológico, propio de la modernidad, con la tecnología en su totalidad (Feenberg, 1999).

Feenberg avanza más allá de la concepción estrictamente ideológica del sustantivismo y revela el carácter político de la tecnología. Los sistemas técnicos reflejan en sus diseños y producciones un sesgo. Este sesgo revela, aunque no en forma siempre evidente, la dominación de grupos con intereses particulares y el poder, ejercido a través del control de la tecnología, sobre otros sectores de la sociedad. Pero el sesgo y el control de la tecnología pueden ser modificados mediante una acción política de resistencia de los grupos subordinados (Feenberg, 2005). La resistencia limita la autonomía de minorías hegemónicas para imponer el diseño que responde a sus propios intereses y que tiende a reproducir su posición de poder. Las modificaciones en el diseño motivadas por la resistencia revelan el carácter ambivalente y flexible de la tecnología (Feenberg, 2002). El control democrático de la tecnología permite que la toma de decisiones no quede exclusivamente librada al criterio de los expertos y a los poderes que estos representan.

No hay una sola forma de tecnología. No existe una esencia de la tecnología como fatalmente anuncia la teoría sustantivista, descartando cualquier otra forma posible de desarrollo tecnológico. Existen caminos alternativos, elecciones técnicas que definen valores, deseos y aspiraciones diferentes a aquellos propios del desarrollo tecnológico actual. Ahora bien, es importante aclarar que en la teoría crítica esos caminos alternativos no dependen de una ideología específica establecida *a priori*; cualquier ideología en la medida que no contemple a la tecnología como una parte esencial de los mecanismos de dominación, fallará

en su pretendida acción liberadora. Si la tecnología no es cuestionada desde su propia esfera, si es solo considerada un instrumento que está en manos de “gente malvada”, los mecanismos de dominación pueden ser similares en el capitalismo o en otra sociedad que se refleje en ideas socialistas. Puede cambiar el propietario de los medios de producción, pero si no cambia el modo de producción, las relaciones de control entre las personas involucradas en el proceso tecnológico no se alterarán. La tecnología será la misma, bajo un sistema u otro (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002).

Ante los graves daños a la salud humana y al ambiente motivados por los “excesos” de la tecnología, la teoría instrumental se resigna a los costos del progreso y propone implementar límites éticos y políticos en las aplicaciones de la tecnología. Por su lado, augurando un futuro distópico inexorable, la teoría sustantivista propone el rechazo de la tecnología y la utopía de un regreso a las fuentes tradicionales de producción, para salvar la humanidad del desastre tecnológico.

Frente a estas posiciones, la teoría crítica propone una transformación de la tecnología que suprima las formas de opresión naturalizadas o mediadas por los sistemas técnicos, las cuales son neutrales solo en apariencia. Es importante distinguir con claridad hacia donde se encamina la crítica de Feenberg: una propuesta que plantee un desarrollo tecnológico alternativo al establecido necesariamente deberá cuestionar la forma de producción y acumulación capitalista. Más allá de los límites morales o políticos que se pueda poner a una determinada tecnología, Feenberg afirma la necesidad de una reforma radical de la tecnología actual. Se trata entonces de una teoría para transformar la tecnología y la sociedad en beneficio de las mayorías (Feenberg, 2002).

3.3. Orígenes y fundamentos de la teoría crítica de la tecnología

El cimiento conceptual de la teoría crítica de la tecnología se compone de los trabajos de varios autores que a partir de mediados del siglo XIX estudian la estructura económica y social de las sociedades modernas y destacan el rol central de la tecnología en la expansión del capitalismo industrial. Feenberg sostiene que es posible trazar una continuidad en la crítica iniciada por Marx que se continúa luego con el abordaje sociológico y político de Max Weber y György Lukács. El recorrido pro-

sigue en las primeras décadas del siglo XX con la crítica social que ensaya la primera generación de la Escuela de Frankfurt y luego con la contribución de Herbert Marcuse para identificar a la tecnología como factor de dominación y control en las sociedades modernas (Feenberg, 2002; Feenberg, 2014). Más contemporáneamente, Michel Foucault extiende esta crítica a la disciplina social que se impone a través del discurso de la ciencia sobre las instituciones que estructuran la sociedad (Feenberg, 2017b). En los párrafos siguientes se reconstruyen algunos aspectos puntuales de los vastos aportes teóricos de estos autores, cuyas ideas conforman el sustrato filosófico de la teoría crítica de la tecnología. El núcleo común que Feenberg rescata de estas teorías es la crítica a un sistema de dominación social mediado a través de distintas instituciones que son presentadas como neutrales. Estas instituciones estructuran la organización social y están legitimadas por un tipo de racionalidad que se pretende y erige como una verdad única y objetiva de la realidad. Para Feenberg esta racionalidad se constituye en base a tres componentes o principios específicos que distinguen las sociedades modernas de las formas tradicionales o premodernas. Estos son: a) el intercambio de equivalentes; b) la clasificación y la aplicación de reglas sistemáticas; y c) la optimización del esfuerzo y el cálculo de los resultados. Estos tres principios son implementados en los mercados de intercambio (principio a) y en las organizaciones burocráticas y la tecnología (principios b y c) (Feenberg, 2008).

Marx aplica la razón dialéctica de Hegel para analizar la estructura económica en el naciente capitalismo. La dialéctica constituye una alternativa diferente al abordaje analítico para la comprensión del mundo. El análisis fragmenta un sistema para estudiar en forma aislada a cada uno de sus objetos componentes. Por el contrario, al introducir un abordaje contextual, la dialéctica recaptura una totalidad de la realidad que no se advierte al estudiar a cada objeto de manera aislada (Feenberg, 2002; Feenberg, 2014). Marx analiza los términos en que se realiza el intercambio económico capitalista y revela así una racionalidad que justifica la apropiación de la renta y tiende a naturalizar las relaciones de clase. De esta forma pone en evidencia un sesgo inherente al sistema capitalista que tiende a permanecer oculto o ser tomado como natural. El cuestionamiento de Marx a esta racionalidad sesgada se centra en los aspectos económicos del sistema. Aunque critica el carácter de clase de la tecnología, el cuestionamiento no se extiende al desarrollo de la so-

ciudad industrial o a la tecnología en sí mismas. De esta manera, la crítica de Marx a la racionalidad capitalista no llega a ser completa y reviste cierto carácter instrumental puesto que en su estudio del desarrollo económico del capitalismo separa la dimensión técnica de la dimensión normativa (Feenberg, 2008).

Max Weber describe la organización de las sociedades modernas en base a un esquema de racionalización. Este marco impone los parámetros de cálculo, eficiencia y control como rectores de la dinámica económica y social. A esta característica de la sociedad moderna Feenberg la llama racionalidad social, rasgo que refiere específicamente al “énfasis en formas de pensamiento y acción que guardan semejanzas con los principios y prácticas científicas y al rol de las organizaciones modernas en la generalización de esas formas al resto de la sociedad” (Feenberg, 2008: 7)⁴. Weber presenta el proceso de racionalización de las sociedades modernas como un imperativo o “jaula de hierro”, una forma necesaria e ineludible para la administración del gobierno y las empresas, independientemente de los objetivos que estas persigan. En consecuencia, para Weber la racionalización es un proceso inevitable, objetivo e imparcial, inherente a la constitución de las sociedades modernas (Feenberg, 2002). Weber no ensaya una crítica filosófica a esta forma de racionalidad propia del capitalismo. En última instancia las diferencias que se generan entre los distintos estratos sociales son consecuencia inevitable de la aplicación de la eficiencia como norma en el funcionamiento de las instituciones administrativas y económicas.

Fue György Lukács quien hizo una conexión entre la racionalidad sesgada de las relaciones económicas analizada por Marx y la organización burocrática de la sociedad moderna descrita por Weber. En *Historia y conciencia de clase*, publicado originalmente en 1923, Lukács introduce el término *reificación* para describir cómo el sesgo en las relaciones económicas y en el proceso de racionalización de las instituciones

⁴ El concepto de racionalidad social de Feenberg se aproxima al de racionalización o racionalidad formal que introduce Weber (Feenberg, 2002: 65). Ambos refieren al tipo de racionalidad del sistema capitalista en la cual los principios y prácticas propias del conocimiento científico son generalizados para explicar el funcionamiento de toda la sociedad. Feenberg aclara que acuerda con Weber solo en el diagnóstico de los fundamentos del funcionamiento de las sociedades modernas en occidente. La coincidencia no se extiende a la conclusión de Weber acerca de la inevitabilidad de este proceso (Feenberg, 2008). En todo caso, el concepto de racionalidad social de Feenberg se emparenta más con el concepto de *reificación* de György Lukács (Feenberg, 2008; Feenberg, 2011).

gubernamentales son naturalizados y extendidos a las relaciones sociales en su totalidad (Feenberg, 2011). Al proyectarse sobre toda la sociedad, la racionalidad económica surgida inicialmente en las fábricas del nascente capitalismo, se constituye entonces como una racionalidad social. La visión del mundo en su totalidad pasa a estar mediada por la técnica, es decir por parámetros de eficiencia y control⁵. Las leyes y los parámetros de la ciencia reducen las relaciones sociales y la interacción del sujeto con la naturaleza a una razón puramente instrumental. La reificación puede entenderse entonces como la construcción de un sentido común que tiende a naturalizar una forma racional y científica en los modos de relación entre los sujetos y entre estos y las instituciones (Feenberg, 2011). En suma, el análisis dialéctico de Lukács intenta revelar una totalidad que se extiende a toda la cultura, y que constituye la racionalidad social sesgada del capitalismo. Como se menciona más arriba, Marx no habla de la racionalización extendida al ámbito social; más bien se restringe a los mecanismos económicos de dominación, al menos en *El Capital*. En cambio, en *Los Manuscritos Económicos y Filosóficos* de 1844, sí desarrolla conceptos filosóficos, en buena medida coincidentes con los de Lukács, pero este texto escrito en 1844, es publicado por primera vez en 1932, casi diez años después que *Historia y conciencia de clase*, publicado en 1923 (Feenberg, 2014).

3.3.1. Tecnología y racionalidad social

En su obra *El hombre unidimensional*, Marcuse sostiene que las relaciones de dominio sobre los seres humanos y la naturaleza quedan ocultas, desde el momento en que la organización de las sociedades modernas se presenta como un hecho técnico y objetivo bajo el manto de la racionalidad formal. Esa presunción de objetividad se extiende a la tecnología, que bajo la inefable justificación de la eficiencia, es utilizada como instrumento de control y dominación social. Marcuse afirma que la racionalidad tecnológica es política tecnológica y sostiene la necesidad

⁵ Lukács se aproxima así a la visión que más tarde ensaya Heidegger en su crítica a la revelación del mundo como puro recurso u objeto de utilidad. Pero, a diferencia de Heidegger, Lukács es marxista y avizora una salida de esa visión del mundo a través de una revolución encabezada por la clase obrera. De acuerdo a Lukács, la racionalidad formal del capitalismo será superada por una nueva racionalidad dialéctica propia del socialismo (Feenberg, 2008).

de crear una nueva tecnología desprovista de los rasgos de opresión propios del capitalismo (Marcuse, 1993). En el concepto weberiano de racionalización, lo que quedaba velado u oculto no eran las consecuencias de la aplicación de la tecnología sino su propia estructura o naturaleza, que permanecía incuestionable. La novedad en la tesis de Marcuse radica en que en el concepto de racionalidad social se incluye a la forma particular que la tecnología asume en el capitalismo. Por ejemplo, es tomado como un hecho natural en la organización del trabajo, que la dirección y el control de los medios de producción no estén en manos de quienes efectivamente llevan a cabo las tareas del proceso productivo. Esto pasa a ser un requisito no explicitado o una prerrogativa de la tecnología que está más allá de cualquier instancia de discusión. También existe entonces una racionalidad tecnológica que condensa lo social y lo técnico, y que

explica cómo las reglas y procedimientos que alcanzan una cierta universalidad también pueden representar intereses privados mediante supuestos que [en realidad] construyen su propia perspectiva. Estos intereses son pasados por alto porque no son expresados a través de órdenes o comandos sino que están incorporados en aspectos técnicos, por ejemplo en el manejo aparentemente neutral de los procedimientos de dirección o en los diseños técnicos (Feenberg, 2002: 66).

La racionalidad que se pretende única y neutral para explicar las leyes de la economía y que Marcuse extiende al desarrollo tecnológico es en rigor una racionalidad sesgada, con la que se justifica la realidad o el “estado de las cosas” en el sistema capitalista. Para Marcuse la tecnología se vuelve un asunto político de primer orden ya que es la forma bajo la cual se sostiene esta racionalidad. Su propuesta es rediseñar la tecnología bajo un sistema social diferente que no se proponga emplearla como forma de opresión social. Foucault extiende esta misma racionalidad a procedimientos y técnicas que se organizan desde el conocimiento y los saberes científicos, los cuales actúan legitimando un poder disciplinario y el control social. Ese control no necesariamente se constituye como un orden represivo externo al sistema de producción sino que es intrínseco a la racionalidad tecnológica del capitalismo. No se trata de un mal uso o aplicación de los saberes, más bien el conocimiento científico y la tecnología establecen un “régimen de verdad” (Feenberg, 2002: 76) que oculta su naturaleza sesgada. Se construye así un

discurso derivado de la verdad y objetividad que se pone en práctica a través de la tecnología como un verdadero ejercicio de poder (Feenberg, 2008; Feenberg, 2017b).

A partir de las tesis de Marcuse y Foucault, la tecnología pasa a ser considerada como una expresión material de la ideología dominante y se revela como un elemento clave para el sostén de la racionalidad social. La estructura que apuntala la racionalidad sesgada del capitalismo ya no se sostiene solamente, como argumenta Marx, en la racionalidad de las relaciones económicas al interior de las unidades de producción. Tampoco el proceso de racionalización de las organizaciones e instituciones a cargo de la administración de la sociedad —la jaula de hierro weberiana—, alcanza para explicar la naturaleza del sesgo en la sociedad capitalista que habilita la dominación y el control de la sociedad. En todo caso, a estos dos factores es necesario sumar el rumbo que ha cobrado el desarrollo de la tecnología en la sociedad moderna (Feenberg, 2008; Feenberg, 2011). El diseño y las producciones tecnológicas, universalmente desplegadas, crean un mundo reificado, uniforme y alienado por una lógica que se vuelve una realidad total. No hay una alternativa a esta totalidad que no sea tildada de romántica o irracional. La política se vuelve solo una rama más de la tecnología y la democracia se transforma en tecnocracia, un sistema de funcionamiento de la sociedad en donde las decisiones quedan mayormente en manos de los expertos⁶. La tecnología también se constituye así en un factor de poder racionalmente justificado, una racionalidad específicamente anclada en la tecnología, aún más eficaz para el control social que los sistemas donde la opresión asume una forma abierta. “Ese objeto, la tecnología omnipresente, está basado en el cálculo y la optimización, y no solamente modela los dispositivos técnicos y los sistemas sociales sino también la conciencia individual” (Feenberg, 2008: 12).

Esta perspectiva distópica de la tecnología no parece ser muy diferente al lugar que el sustantivismo heideggeriano le asigna a la técnica.

⁶ La idea de un gobierno a cargo de científicos e industriales es sostenida por Saint Simon a comienzos del siglo XIX. En el siglo XX, científicos y escritores defensores del “socialismo científico” como H.G. Wells, C.P. Snow y John D. Bernal sostuvieron que la ciencia y la tecnología debían ser la principal fuente de autoridad en la sociedad (Ziman, 2003). Bernal propuso a mediados del siglo pasado un gobierno dirigido por científicos como garantía de una organización racional de la sociedad. De este modo se podría “superar las limitaciones que la naturaleza, el cuerpo y las emociones humanas imponen a la alma racional” (Noble, 1999: 213).

Pero mientras la solución de Heidegger es el retiro hacia una vida espiritual o la apelación final a un posible dios salvador (Feenberg, 2005), Marcuse y Foucault avizoran la posibilidad de cambio y proponen un rediseño de la tecnología bajo otro orden social. Sin embargo, Feenberg argumenta que estos autores no elaboran un marco teórico completo que detalle los mecanismos a través del cual se generan los procesos de racionalización tecnológica. Aunque Marcuse propone una resistencia total contra el sistema y Foucault nuevas formas de lucha basadas en microrresistencias a nivel local (Feenberg, 2002), no se establecen mayores precisiones sobre las etapas o elementos específicos del proceso de desarrollo tecnológico que necesariamente deben ser modificados para salir de un régimen tecnocrático. Algo crucial queda pendiente cuando surge el interrogante sobre cómo avanzar hacia una opción alternativa, sin que esto implique desestimar a la tecnología en sí misma.

3.3.2. *La contribución de la teoría crítica de la tecnología*

Las tesis de la tecnología como factor de dominación social constituye una perspectiva relevante, sobre todo a la luz del rol secundario que históricamente la teoría política y las disciplinas humanistas habían concedido a la tecnología. Feenberg destaca que este trazo puede advertirse desde la misma antigüedad; en su escala de valores, los griegos consideraban a la técnica (*techné*) en un nivel inferior respecto a la teoría y la política. Los enciclopedistas y más tarde los grandes pensadores de los siglos XVIII y XIX asignaron a la tecnología un rol esencialmente instrumental (Feenberg, 1999; Mitcham y Schatzberg, 2009).

Feenberg toma como punto de partida el hecho político que supone la tecnología y profundiza la crítica a la racionalidad tecnológica mediante lo que denomina teoría de la instrumentalización (Feenberg, 2002; Feng y Feenberg, 2008). La tecnología está efectivamente cargada de valores como sostienen las teorías sustantivistas; pero lejos de constituir una esencia inmutable o una esfera diferente que solo puede subordinar a la sociedad, la tecnología es un hecho social y está sometida a las contingencias que ello implica. Feenberg propone una resistencia contra el avance de la dominación mediada por la tecnología, pero no lo hace desde un exterior, sino uniendo la lucha política al interior mismo del proceso tecnológico (Feenberg, 2005). Su análisis se enfoca en la naturaleza política del diseño, al cual explica como un proceso de

disputa política entre distintas alternativas. Para ello recurre a los estudios sociales contemporáneos de la ciencia y la tecnología adaptando críticamente conceptos de la corriente constructivista que revelan el carácter esencialmente contingente y socialmente determinado del diseño tecnológico (Feenberg, 2017a)⁷.

Articulando conceptos específicos del sustantivismo y el constructivismo, Feenberg desarrolla un marco teórico al que denomina teoría de la instrumentalización. A través de esta teoría, el autor explica las relaciones del ser humano con los objetos de su entorno y las vías mediante las cuales estos objetos son luego introducidos en la vida social e integrados a los sistemas técnicos.

3.4. Teoría de la instrumentalización

Feenberg da cuenta de tres aproximaciones diferentes al problema de la tecnología (Feenberg, 1999). Por una parte, una visión ingenieril que aborda la tecnología desde una dimensión estrictamente técnica y que se ocupa de explicar la estructura y el funcionamiento de los objetos técnicos. Por otro lado, una perspectiva filosófica que indaga sobre el sentido o el significado de la tecnología como fenómeno social. Si la primera concepción se vincula con una perspectiva instrumentalista de la tecnología, sin interrogarse más allá de lo evidente en el mundo de las herramientas y las máquinas, la segunda aproximación se afirma precisamente en la negación de esa evidencia superficial: la esencia de la técnica no es una cuestión técnica, como sostuvo certeramente Heidegger (Heidegger, 1997). Sin embargo, en esta indagación filosófica ha predominado una mirada esencialista que caracteriza a la tecnología de manera unívoca y con connotaciones fuertemente negativas. Para esta perspectiva, la tecnología es una fuerza que concibe a los objetos y sujetos del mundo en términos estrictos de recursos útiles para su explotación.

Una tercera perspectiva proviene de la corriente constructivista de

⁷ El constructivismo argumenta que las distintas etapas de un desarrollo tecnológico dependen esencialmente del contexto social y su complejidad de intereses en pugna. Su tesis fundamental sostiene que la preeminencia de una determinada innovación tecnológica por sobre otras alternativas posibles, no está relacionada con la eficiencia intrínseca de sus atributos técnicos. Más bien, el escenario social, a través de la disputa de intereses de los distintos grupos próximos a la escena del diseño, termina favoreciendo a un tipo de innovación por sobre las demás (Pinch y Bijker, 2012; Feenberg, 1999).

los estudios sociales de la ciencia y la tecnología. El constructivismo sostiene la contingencia histórica y social de la tecnología y explica el desarrollo tecnológico como el resultado de las complejas relaciones establecidas entre los actores humanos y los objetos técnicos (Feenberg, 1999; Pinch y Bijker, 2012). En su teoría de la instrumentalización, Feenberg condensa las concepciones sustantivistas y constructivistas para explicar el fenómeno de la tecnología. Cada una de estas concepciones define dos niveles diferentes: en el nivel primario Feenberg recurre al sustantivismo para definir la esencia de la tecnología; en el nivel secundario recurre al constructivismo para dar cuenta del carácter social de la tecnología. Al quedar integradas en un único marco teórico, ambas perspectivas resultan modificadas respecto de su concepción original. A primera vista aparece como paradójica la definición de una esencia para la tecnología en una construcción teórica de Feenberg. Precisamente, a lo largo de su obra, el autor rechaza una caracterización esencial que atribuya una forma única a la tecnología. A diferencia del sustantivismo, la esencia a la que se refiere el autor está relativizada por el contenido del segundo nivel, a través del cual se acota y mediatiza la realización específica de la tecnología en un contexto social determinado. De la misma forma, en la teoría de la instrumentalización el análisis constructivista no se restringe a un análisis sociológico exhaustivo de la trama que une los componentes humanos y los objetos implicados en cada tecnología específica. Más bien, integra este análisis en un marco ideológico general que da cuenta de la función de la tecnología en la legitimación del sistema capitalista (Feenberg, 1999).

Feenberg propone la teoría de la instrumentalización como una versión crítica de la racionalidad tecnológica. Inicialmente este marco fue aplicado al diseño técnico, pero el autor sostiene que tiene un carácter más general que permite extenderlo como herramienta de análisis a otras esferas de la racionalidad social (Feenberg, 2002; Feenberg, 2008). Para explicar la dinámica del fenómeno tecnológico, el autor postula dos mecanismos de instrumentalización o racionalización que operan en dos niveles diferentes. Un nivel básico, que Feenberg llama instrumentalización primaria, se fundamenta en conceptos desarrollados en la teoría sustantivista y refiere a la revelación de los objetos del entorno como simples recursos o materias primas, aquello que Heidegger designó como *Ge-stell* (Schwyter, 2011). Esto implica un mecanismo de descontextualización del objeto que es de este modo separado de su entorno

original. El objeto aislado es luego reducido a aquello que va a ser específicamente dispuesto para cumplir una cierta función. Se trata de una operación de racionalización elemental que Feenberg caracteriza como la orientación técnica hacia la realidad y que efectivamente, tal como sostienen las perspectivas esencialistas de la tecnología, revela lo mundano en términos puramente instrumentales o de estricta utilidad. El concepto de instrumentalización primaria tiene sus raíces teóricas en el sustantivismo de Heidegger y se corresponde con la crítica posterior de la Escuela de Frankfurt y Marcuse a la sociedad reificada y cosificada por la tecnología. En un segundo nivel de instrumentalización, el objeto descontextualizado y simplificado de acuerdo a la función que se le asigna, es ahora recontextualizado e integrado en un entorno social específico. Aquí Feenberg recurre a los conceptos desarrollados por el constructivismo para explicar la dinámica del proceso de diseño tecnológico. En la etapa del diseño los objetos y elementos técnicos son combinados en un artefacto concreto, de acuerdo a un arreglo creciente de restricciones (Feng y Feenberg, 2008). Las restricciones finalmente adquieren un carácter normativo, quedando sistematizadas en lo que Feenberg llama código técnico (Feenberg, 2002). El código técnico de un artefacto refleja el orden social vigente y las relaciones de poder entre distintos actores en pugna. La imposición de una alternativa de diseño determinada por sobre otras posibles depende de la fuerza relativa de cada uno de estos actores para hacer prevalecer sus propios intereses (Feenberg, 2005). De acuerdo a la corriente constructivista, el diseño tecnológico no se concreta únicamente con arreglo a parámetros puramente técnicos, como la eficiencia, la confiabilidad o el rendimiento. La concepción usual que tenemos de “lo técnico” como parte de una dimensión de verdad objetiva apartada de la sociedad, tiende a abstraer los objetos de su entorno social. Lógicamente, los recursos básicos revelados en la instrumentalización primaria no son combinados de manera azarosa. Pero eso no significa que puedan ser combinados de una única forma, presuntamente neutral y objetiva, con arreglo a un concepto único de eficiencia. En consecuencia, en la teoría de la instrumentalización de Feenberg, el diseño que emerge del ámbito estrictamente técnico tiene un carácter subdeterminado; existen factores sociales y políticos que terminan de completarlo en su configuración final (Feng y Feenberg, 2008). En última instancia, el diseño final de un artefacto dependerá de una dimensión mucho más amplia, relacio-

nada con la estructura y la racionalidad social imperante⁸. A este nivel de racionalización, que refiere a la aplicación específica del objeto y a su realización concreta en un contexto técnico y social determinado, Feenberg lo denomina instrumentalización secundaria. De esta forma, el autor argumenta que lo que a menudo se presenta como dos teorías contrapuestas del desarrollo tecnológico (que en sus versiones más radicales se corresponden con la dicotomía determinismo tecnológico versus determinismo social), son en realidad dos niveles diferentes que operan sobre un mismo fenómeno u objeto tecnológico. En palabras del propio autor:

Mi intención al analizar la tecnología a estos dos niveles es combinar la mirada esencialista de la orientación técnica como modo de revelación del mundo con la mirada crítica y constructivista sobre la naturaleza social de la tecnología. Pretendo demostrar que lo que usualmente se presenta como teorías alternativas son en realidad dos niveles analíticamente distinguibles en la complejidad de un objeto tecnológico (Feenberg, 2002: 176).

Feenberg enfatiza en su análisis la distinción entre estos dos niveles de instrumentalización. La distinción es importante porque los dos niveles, aunque suponen acciones diferentes y están separados temporal y espacialmente, no tienen una diferenciación taxativa y no son completamente independientes uno de otro. Aunque tal vez no sea evidente, en el nivel primario ya existe un cierto condicionamiento social, ya que aquello que es útil y aquello que no lo es constituye una elección basada en una determinada clasificación o en un criterio normativo previamente asignado. La utilidad de un objeto no es una cualidad natural inherente a ese objeto. No existe en forma pura o neutral sino que se establece en referencia a un sistema social que establece un determinado criterio de

⁸ Esta referencia a la influencia de una racionalidad social o marco sociológico general en la configuración final de un artefacto incluye una crítica de Feenberg a la corriente constructivista de la tecnología que establece una diferencia con respecto a su teoría crítica. Para Feenberg, la teoría de la construcción social de la tecnología y la teoría del actor-red destacan el carácter contingente del diseño tecnológico pero focalizan el análisis en revelar la trama de intereses inmediatos y específicos entre los distintos grupos sociales que disputan la configuración del diseño. Se trataría de una racionalidad mucho más acotada a una disputa específica, influida por la historia y el desarrollo particular de una tecnología determinada antes que por un sistema de valores y prácticas culturales que abarca a la sociedad en su conjunto (Feng y Feenberg, 2008).

utilidad. Del mismo modo, las especificaciones en torno al diseño de los objetos presuponen la existencia de los mismos y no son detalladas de manera abstracta sino en base a una identificación previa. “La sociedad y sus sistemas racionales no son entidades separadas. La distinción entre ellas es principalmente analítica y metodológica, antes que una distinción real entre cosas que existen de manera independiente una de otra” (Feenberg, 2008: 15). Para graficar la relación que existe entre los dos niveles de instrumentalización, Feenberg recurre al ejemplo de la tala de un árbol para la construcción de una vivienda. En el nivel primario, el árbol es talado, extraído de su nicho ecológico natural, cortado y reducido a su parte funcional. Pero este no es cualquier árbol sino uno cuya madera es apta para la construcción. Del mismo modo, el acto de derribar el árbol y cortar la madera no es azaroso; depende en todo caso de una serie de prescripciones que la construcción de viviendas impone. En definitiva, en la instrumentalización primaria están contenidas restricciones propias de la instrumentalización secundaria (Feenberg, 2002). La interrelación entre los dos niveles de instrumentalización es muy importante porque contribuye a despejar la idea de que hay una esfera técnica, objetiva y neutral, separada de los fenómenos propios de la vida social.

3.4.1. Un ejemplo de instrumentalización primaria y secundaria

En un artefacto tecnológico moderno, los elementos básicos son aquellos cuyas funciones elementales los hacen necesarios y adecuados para toda una variedad de objetos funcionalmente relacionados. Por ejemplo, un circuito eléctrico, un motor elemental, un dispositivo para la circulación de gases refrigerantes, materiales aislantes de distinto tipo, entre otros, conforman una colección de elementos básicos de utilidad general que pueden ser combinados para fabricar distintos artefactos, todos ellos relacionados con la refrigeración. Estos elementos básicos constituyen el nivel de instrumentalización primaria de un artefacto. Este es el punto inicial, a partir del cual comienza el diseño de un objeto como un proceso progresivo de combinación específica de estos “elementos técnicos” básicos (Feenberg, 2002: 77-78). Mediante sucesivas etapas de instrumentalización secundaria, los objetos tecnológicos incorporan diferentes atributos. Alguno de ellos están relacionados con la necesaria compatibilidad entre los elementos técnicos básicos, otros atienden a una mayor seguridad de los artefactos y otros aún contem-

plan aspectos éticos, legales y estéticos (Feenberg, 2008). Conforme se avanza en el proceso de instrumentalización secundaria, la combinación de los elementos técnicos más básicos adquiere una configuración definitiva. Definitiva significa aquí que esa configuración particular de elementos técnicos ya no vuelve a ser revisada; por el contrario, pasa a conformar un modelo establecido, una suerte de paquete cerrado o “caja negra” que ya no se somete a una nueva revisión. En los diseños posteriores de ese objeto tecnológico, la comunidad de expertos hereda este paquete que pasa entonces a formar parte de un sentido común, aquello que se da por sentado de antemano, simplemente “porque es así” (Feenberg, 2002: 18), y no es sometido a una nueva discusión. Feenberg señala que este acto de clausura en el proceso de diseño contribuye a alimentar la ilusión de que la tecnología es una mera aplicación técnica de conocimientos, abstraída de la dinámica social. Bajo esa concepción, la tecnología quedaría completamente determinada por lo que el autor denomina nivel de instrumentalización primaria (Feenberg, 2008). Es precisamente en esos espacios cerrados a la reflexión en donde anidan los sesgos de la tecnología que ya no se ven como tales. Feenberg sostiene que “estas opciones dejadas de lado son precisamente las que los investigadores deberían observar si se proponen revelar los valores asumidos como dados que son parte de la “caja negra” del diseño tecnológico” (Feng y Feenberg, 2008: 115).

El clorofluorocarbono (CFC), gas utilizado como refrigerante en los equipos de frío, ilustra bien este concepto. Era un hecho consumado que todos los equipos de refrigeración contuvieran CFC para cumplir de manera eficiente su función. Sin embargo, cuando diversos grupos hicieron sentir sus reclamos por el daño causado en la capa de ozono y por sus consecuencias negativas para la salud, el CFC comenzó a ser cuestionado hasta que finalmente dejó de utilizarse como refrigerante (Feng y Feenberg, 2008). Lo mismo puede argumentarse respecto a otros elementos de la vida cotidiana revelados como nocivos para la salud, como es el caso del plomo en las pinturas o el teflón en los utensilios de cocina. La puesta en cuestión de la “caja negra” o de aquellas configuraciones que han quedado cristalizadas en los artefactos, pone de manifiesto al diseño como un espacio susceptible de ser modificado y a la tecnología como un fenómeno social de naturaleza contingente y flexible.

3.4.2. El problema de la neutralidad en la tecnología

Aunque la teoría crítica desestima la perspectiva instrumentalista de la tecnología, no deja de reconocer una condición de neutralidad en ciertos materiales elementales. Se trata de aquellos componentes estructurales comunes en una gran variedad de artefactos a los que Feenberg llama elementos técnicos. Cuando estas piezas básicas son apropiadamente ensambladas conforman un objeto tecnológico (Feenberg, 2002: 77-78). Pero el autor establece una distinción analítica clara entre estos elementos técnicos básicos y los objetos en los cuales ellos son finalmente ensamblados. Si bien estas piezas básicas (un engranaje, un circuito electrónico, o una secuencia de ADN, cuando se considera un producto biotecnológico) han sido producidas en un escenario social específico, al ser consideradas de manera aislada o individual son “relativamente neutrales”. Feenberg (2002) utiliza la expresión “relativamente neutrales”, porque

... aunque no para todos los propósitos, al menos son [neutrales] en relación a aquellos objetivos que involucran el control y la subordinación de otros grupos sociales. [Estas piezas o elementos técnicos] surgen de descubrimientos tan básicos que, aunque pueden haber servido inicialmente para un propósito específico, pueden ser usadas para muchos propósitos en una amplia variedad de contextos (pp. 77-78).

Sin embargo, luego de reconocer esta neutralidad elemental, Feenberg reafirma que el sesgo es un componente estructural de la tecnología. Y reafirma además que ese sesgo, que efectivamente se manifiesta en el momento de la aplicación o en el uso de un determinado artefacto, se introduce de hecho en una instancia anterior, durante el diseño mismo de un artefacto. Cuando los elementos técnicos son dispuestos de manera conjunta en un objeto concreto, el ensamble entre ellos no es azaroso, ni es un acto puramente técnico, realizado por el genio de un grupo de expertos. El objeto tecnológico tampoco representa la simple sumatoria de sus elementos técnicos componentes. De manera análoga a las propiedades emergentes en los organismos vivientes que examináramos en el Capítulo II, al ser combinados entre sí los elementos técnicos cobran un significado diferente, pierden su neutralidad inicial y adquieren una configuración que siempre expresa determinados intereses (Feenberg, 2002). A esto se refiere la teoría crítica cuando sostiene que el diseño tecnológico expresa un sesgo. Ahora bien, la tecno-

logía no existe como concepto abstracto sino en sus manifestaciones que suceden en contextos de aplicación concretos. “El sesgo como tal no se origina en los elementos técnicos sino en su configuración específica en un mundo real de tiempos, lugares y herencias históricas —en suma, en un mundo de contingencias concretas” (Feenberg, 2002: 81)⁹. La configuración final de un objeto reflejará entonces el contexto social específico en que ese objeto es producido. En las secciones siguientes se analiza con más detalle el concepto de diseño, el papel que juegan los diseñadores y diseñadoras y la forma en que el sesgo es introducido en el proceso de fabricación de un artefacto tecnológico.

3.5. El diseño tecnológico

La teoría crítica se interroga en torno a una definición característica del concepto de diseño:

[Es] el proceso de fabricación intencional de un artefacto para adaptarlo a objetivos y ámbitos específicos. Nuestro enfoque conceptualiza el diseño como un proceso a través del cual convergen consideraciones técnicas y sociales para producir artefactos que se adapten a contextos específicos (Feng y Feenberg, 2008: 105).

¿Cómo ocurre este proceso de convergencia entre lo técnico y lo social? ¿Hasta qué punto influyen cada uno de estos dos aspectos? Si el diseño es por definición un proceso de fabricación consciente, ¿hay algún factor más que lo influya, además de la experticia técnica del diseñador? En otras palabras, las preguntas formuladas refieren a uno de los componentes que describen la naturaleza dual de los artefactos (Kroes y Meijers, 2006), como hemos discutido en el Capítulo II. ¿De qué naturaleza se compone la intención del experto/a?

Para analizar estos interrogantes, Feenberg identifica tres perspectivas diferentes respecto al proceso de diseño (Feng y Feenberg, 2008). La primera perspectiva sostiene que el diseñador tiene una gran auto-

⁹ Feenberg refuerza esta idea con una sentencia gráfica de Don Ihde: “puede ser fuerte en este punto la tentación de arribar a una conclusión, que ignore el contexto, según la cual la tecnología como tal es algo neutral y que cobra su significado de acuerdo a las diferentes aplicaciones que se haga de ella”. Y más adelante: “La tecnología es lo que es únicamente en relación a un contexto” (Feenberg, 1999: 213).

nomía para su trabajo; en consecuencia, el acto de diseño dependerá fundamentalmente de sus propias intenciones y de su capacidad. Si el diseñador cuenta con suficiente capacidad técnica, no tendrá mayores problemas en lograr un buen diseño. El diseñador puede tomar en cuenta las necesidades de distintos actores que van a relacionarse con el artefacto objeto del diseño (empresarios que van a fabricarlo, intermediarios que van a venderlo, otros profesionales de áreas técnicas relacionadas). Pero el control general del proceso es una atribución suya, la cual le es conferida en base a su experticia. En todo el proceso, el público no cuenta con ninguna injerencia y solo tiene reservado el papel de usuario del artefacto. En esta concepción del diseño el aspecto técnico ocupa un lugar casi excluyente. Por lo tanto, no existe un interrogante que contemple algún conflicto, más allá de los dilemas estrictamente técnicos. En suma, la configuración final que adopta el artefacto es dependiente entonces del conocimiento profesional. Lo que aquí se entiende por intención es de alguna manera homologable a la capacidad técnica concentrada en el profesional del diseño. En función de la casi absoluta primacía del aspecto técnico, Feenberg vincula esta perspectiva del diseño con la visión instrumentalista de la tecnología.

La segunda perspectiva sobre el proceso de diseño plantea que el diseñador tiene una autonomía más restringida para concretar su trabajo. Diversos factores económicos, sociales, políticos, institucionales y culturales imponen límites a las intenciones del diseñador, quien debe negociar la configuración del artefacto con otros actores interesados. Aunque este grupo de actores pueda ser acotado y próximo al entorno del diseñador, este no dispone de autonomía plena para aplicar libremente sus conocimientos técnicos. Bajo esta perspectiva entonces, el diseño final dependerá de los intereses de cada uno de los actores y del proceso de disputa y negociación entablado a partir de los potenciales conflictos existentes entre ellos. La intención y la experticia del diseñador tienen aquí un margen más estrecho y conforman un factor más dentro de varios otros que influenciarán la configuración final del artefacto. Por este motivo, Feenberg relaciona esta perspectiva del proceso de diseño con los estudios sociales de la ciencia y la tecnología, y más particularmente con las tesis del constructivismo.

Finalmente, en la la tercera perspectiva, Feenberg propone que el diseño depende del diseñador y también de los actores más próximos a él, pero en una medida aún menor que en las dos perspectivas anteriores.

Más bien, el proceso se ve influenciado de manera decisiva por el contexto social, económico y cultural propio de la época, una dimensión mucho más amplia, relacionada con una racionalidad social. El contexto ejerce su influencia a través de un mecanismo que instala en todos los ámbitos de la sociedad una serie de tendencias o sesgos que no aparecen como tales, en realidad se ven como algo natural que forma parte de un sentido común. En esta perspectiva, los factores que influyen el proceso de diseño exceden largamente, tanto la experticia técnica del diseñador, como los valores e intereses propios de los actores próximos al él. Más bien, el proceso será la resultante de un conjunto de valores culturales de la época, los cuales dictan una lógica común al conjunto de actores involucrados en el diseño. De modo que la intención de estos actores también está compuesta por esta impronta que se origina en el contexto social. A esta perspectiva, que identifica una racionalidad social entre los condicionantes del diseño, Feenberg la relaciona con la teoría crítica de la tecnología (Feng y Feenberg, 2008).

En conclusión, la voluntad del diseñador puede tener grados variables de influencia en el proceso de diseño. Pero aún en aquellos casos en donde su intención sea el factor principal, la impronta social no estará completamente ausente en la determinación del diseño. La forma en que el diseñador recibió su propio entrenamiento, o los artefactos con funciones semejantes que antecedieron el objeto que se diseña en el presente, reflejarán esa huella. Dicho en otras palabras, el diseñador es un experto que tiene una suerte de impronta social incorporada en su quehacer técnico. Los elementos técnicos son ensamblados en un objeto con arreglo a pautas y convenciones que deben ser satisfechas, para así posibilitar que el objeto ingrese en el contexto social en que fue diseñado. Ahora bien, esta dimensión “extra técnica” queda en buena medida eclipsada precisamente por la sobredeterminación de las cuestiones estrictamente técnicas en el proceso de diseño tecnológico (Feenberg, 2008). No resulta evidente ni sencillo advertir que, aquello que aparenta derivar de una racionalidad exclusivamente técnica y objetiva, contiene un conjunto de valores que hacen del diseño y de la tecnología en general la resultante de un proceso de construcción social. En palabras de Feenberg “... aún cuando estén involucrados en una actividad “puramente técnica”, los diseñadores son guiados por reglas que son específicamente culturales y que contienen una carga valorativa. De esta forma el diseño siempre exhibe un sesgo social” (Feng y Feenberg, 2008: 110).

Esto implica entonces, en contraposición a la presunta neutralidad de un “hecho técnico” y objetivo, que el diseño siempre contiene un sesgo en su estructura. Además de las relaciones existentes entre los distintos grupos próximos al diseño, el sesgo necesariamente refleja la estructura social y la cultura imperante (Feenberg, 2005). Sin embargo, como analizaremos en las secciones siguientes, en la mayoría de los casos el sesgo no se expresa de manera abierta; más bien queda diluido o revestido por una explicación o justificación de orden técnico; a esa justificación que objetiva el sesgo de la tecnología y lo enmascara como un mero hecho técnico, Feenberg la llama “código técnico” (Feenberg, 1999: 87-88).

3.5.1. *El sesgo en el diseño*

Para la teoría crítica el diseño está condicionado y es producido por la compleja trama de relaciones de poder que vincula a los diferentes actores sociales. Esto alcanza tanto al ámbito social inmediato que rodea el proceso de diseño, como a las relaciones existentes en la sociedad en su conjunto. Ahora bien, si la tecnología es política y está sujeta a las relaciones de poder, entonces no se trata de un fenómeno inmutable sino más bien expuesto a cambios, en la medida en que se cuestionen o modifiquen esas relaciones de poder (Feenberg, 2005).

Para Feenberg la carga política de la tecnología adquiere una materialidad real y queda impresa en el diseño, aunque el sesgo no siempre se exprese de una manera evidente¹⁰. El diseño de un artefacto o proceso

¹⁰ A partir del concepto weberiano de racionalidad sustancial y formal aplicado en relación a los modos de organización del capitalismo en las sociedades modernas, Feenberg distingue dos clases diferentes de sesgo: el sesgo sustancial y el sesgo formal. Para comprender la naturaleza del sesgo es necesario vincularlo con el concepto de neutralidad (Feenberg, 2002). El sesgo sustancial supone un sistema que establece diferencias esenciales entre personas, por ejemplo por su origen étnico o sus rasgos físicos. En este caso, sesgo y neutralidad son conceptos opuestos y excluyentes. Pero, en lo que Feenberg llama sesgo formal, existen situaciones donde el sesgo y la neutralidad no son excluyentes uno a otro y coexisten en un mismo sistema. Por caso, un examen para ingresar a una institución pública educativa es el mismo para cualquier aspirante. El examen considerado en sí mismo es claramente neutral. Sin embargo no se puede afirmar que esté desprovisto de sesgo. Al ser considerado de manera aislada y no contextual, el diseño del examen podría no contemplar las diferentes formaciones de los aspirantes. Nada impide que estos accedan libremente al examen, no hay sesgo sustancial. Pero las diferentes capacidades de los aspirantes, relacionadas con el dispar ambiente material y social en que se han formado, sí introduce un sesgo formal. El punto de partida de distintos estudiantes para afrontar el mismo examen no es el mismo.

tecnológico reproduce los valores y las relaciones sociales vigentes en distintas épocas históricas. Para sostener sus afirmaciones Feenberg recurre a una serie de ejemplos concretos. A mediados del siglo XIX, en el apogeo de la Revolución Industrial, el tamaño de las máquinas estaba adaptado al de los niños que las manipulaban. Hubo un fuerte debate en torno a este tópico que enfrentó, por un lado a los defensores de los incipientes derechos de la niñez y, por el otro lado, a los economistas y propietarios de las fábricas. Estos últimos aducían que no era posible modificar el diseño de las máquinas sin disminuir la eficiencia en la producción. Pero el trasfondo del debate no era técnico sino cultural y económico y estaba relacionado con la representación social de la niñez y con la posibilidad de acceder a mano de obra barata al comienzo del período victoriano en Inglaterra. De hecho, cuando el debate fue saldado los niños fueron enviados a las escuelas, las máquinas fueron finalmente modificadas y adaptadas para el trabajo de los adultos y la eficiencia en la producción no dejó de aumentar en los años siguientes (Feenberg, 1999). Una primera conclusión de este fenómeno histórico, paradigmático en el estudio del significado de la tecnología, es que tempranamente en el período moderno, la tecnología fue eficaz como instrumento para el control social. Además de servir como mano de obra, los niños en las calles representaban un serio problema de disciplina para los cánones de la época. Otra conclusión es que, lejos de cualquier determinismo técnico, el diseño exhibe una gran flexibilidad y puede ser modificado en favor de diferentes propósitos sociales.

Ejemplos similares han sido analizados en torno a las calderas que propulsaban los barcos a vapor en Estados Unidos en la primera mitad del siglo XIX. Frecuentemente, las calderas estallaban causando un gran número de víctimas. El reclamo público para adoptar un sistema más seguro se extendió por casi medio siglo, motivado por la fuerte resistencia de los propietarios a modificar el diseño y la consiguiente pérdida económica que ello implicaba. Feenberg analiza en este caso particular el significado que tienen las demandas del público. El ejemplo le permite al autor poner en evidencia el carácter flexible del diseño y volver sobre su naturaleza indeterminada desde el punto de vista técnico:

Feenberg proyecta su análisis del sesgo formal a los sistemas técnicos: “el sesgo, en este caso no se origina en los elementos técnicos sino en las configuraciones específicas que adquieren en un mundo real, de tiempo, espacio y herencias históricas; en suma, un mundo de contingencias concretas” (Feenberg, 2002: 81).

La legislación no hubiera sido necesaria para lograr esto [un diseño más seguro] en caso de que las mejoras hubieran estado determinadas técnicamente. Pero en realidad el diseño de la caldera era dependiente de una evaluación social acerca de la seguridad (Feenberg, 1999: 95).

Los ejemplos de las máquinas de la Revolución Industrial y de los barcos a vapor revelan que desde una posición de poder y autonomía es posible imponer aspectos técnicos en el diseño de un objeto tecnológico. Pero esta configuración tiene una naturaleza inestable puesto que en última instancia estará sometida al juicio del público usuario. Ahora bien, para la teoría crítica los artefactos tienen una naturaleza política. Este aspecto político se refleja en dos instancias, el diseño y el uso o aplicación. En la instancia de aplicación lo político se vuelve evidente, a través de la resistencia activa y la demanda de modificaciones por parte del público usuario. En cambio, en la instancia del diseño, donde el diseñador cuenta con un presunto margen para resolver la configuración más apropiada en base a su experticia, lo político queda oculto por los aspectos técnicos (Feenberg, 1999; Feng y Feenberg, 2008; Feenberg, 2017a). Podemos entonces pensar a estas dos instancias en una relación dialéctica en permanente tensión. Por un lado, una instancia social, que en la forma de diferentes reclamos, demanda una modificación democrática del diseño, para que este responda al interés mayoritario del público. Por otro lado, aquello que se presenta como técnico, determinado por el conocimiento del diseñador y basado en un concepto de eficiencia que atiende a los intereses que representa. En cada una de estas instancias intervienen en mayor o menor grado aquello que llamamos actores intermedios, movilizados por sus propios intereses para favorecer alguna de las diferentes alternativas del diseño. Esta tensión dialéctica va modelando la configuración de un artefacto, que bajo esta dinámica recorre una determinada trayectoria tecnológica (Thompson, 2012b). Algunos aspectos del diseño encuentran un nivel de resolución de esa tensión y quedan finalmente asentados. Otros aspectos, aún no asentados, continúan bajo disputa, precediendo a nuevas modificaciones en la configuración. En cualquier caso, todo el proceso está atravesado por la política que se convierte así en una fuerza propulsora del cambio tecnológico (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002). En el apartado siguiente examinaremos los mecanismos que permiten a los actores dominantes ocultar el sesgo en el diseño que favorece sus propios intereses y presentarlo, en cambio, como la opción más apropiada para el interés general.

3.6. La doble función de un artefacto: el código técnico

El diseño siempre es presentado como algo lógico y autoevidente, que de manera natural responde a un interés general o al bien común en la sociedad. Pero, al objetivar a la tecnología como un fenómeno neutral que responde a criterios técnicos de eficiencia, se tiende a ocultar el interés particular de un determinado grupo dominante o hegemónico. El sesgo queda entonces enmascarado en el interior de un concepto objetivo y normativizado, a través de una justificación de orden estrictamente técnico. Como se menciona en la Introducción, a esta justificación Feenberg la llama código técnico y la define como “la materialización de un interés bajo la forma de una solución técnica coherente a un cierto problema” (Feenberg, 2005: 114). El código técnico es una forma de expresión de la racionalidad tecnológica. Es la naturalización de procedimientos y diseños que quedan así más allá de la posibilidad de examen crítico porque están invisibilizados o sedimentados en esa racionalidad (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002; Feenberg, 2008; Feenberg, 2011).

El marco de análisis de la teoría crítica identifica entonces dos funciones con diferentes significados contenidas en un objeto tecnológico: por un lado, una función de estricto carácter técnico, la cual es expresamente manifiesta. Aquí el objeto representa una innovación o aporta una solución frente a lo que había sido previamente conceptualizado como un problema. Por otro lado, el objeto satisface una función política; en esa misma innovación o solución técnica el diseño preserva y reproduce los intereses y el control de un grupo dominante en la sociedad (Feenberg, 2005). En palabras del autor “La teoría crítica muestra cómo estos códigos sedimentan valores e intereses en la forma de reglas, procedimientos, dispositivos y artefactos, que naturalizan la búsqueda de poder y beneficios para una hegemonía dominante” (Feenberg, 2002: 15). En última instancia, un código técnico revela un mecanismo de ejercicio de poder mediado por la tecnología. Al no ser un mecanismo explícito, el análisis sociológico es la vía para correr el velo de los aspectos técnicos y revelar la significación política de la función de un objeto tecnológico (Feng y Feenberg, 2008).

El código técnico delimita de manera objetiva la función de un objeto o proceso tecnológico. Una vez que se le ha asignado un significado, el diseño de un objeto se concreta con arreglo al código técnico. De esta

forma quedan relegadas las disputas previas entre las configuraciones alternativas de diseño. El diseño final adoptado es presentado como el más eficiente para cumplir con la función asignada. Sin embargo, lo que realmente está en disputa en la etapa de diseño, antes que la eficiencia, es el sentido y el uso que se va a asignar a un objeto. La atribución de la mayor eficiencia es un acto posterior a la clausura de la disputa acerca del sentido del objeto. Así la eficiencia aparece como una causa *pero en realidad es una consecuencia* del predominio de una determinada alternativa tecnológica por sobre otras. Esta discriminación es importante porque revela los valores sociales incorporados en un objeto y despeja la apariencia de que la disputa entre modelos alternativos es de naturaleza puramente técnica.

El diseño de la bicicleta constituye un ejemplo clásico que ha sido analizado sociológicamente con gran detalle por los autores de la corriente constructivista de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología (Feenberg, 2002; Pinch y Bijker, 2012). A fines del siglo XIX se definió a la bicicleta como un medio de transporte para uso masivo. Lógicamente su diseño debía reunir entonces requisitos mínimos de seguridad para el cumplimiento de la función asignada. Quedó establecido de esta forma un código técnico que definió y normativizó un sentido definitivo para el uso de la bicicleta. En este caso, la mayor eficiencia se relacionaba con una mayor seguridad del modelo de dos ruedas de igual tamaño, respecto al modelo alternativo de dos ruedas de diferente tamaño. Sin embargo, lo que inicialmente estaba en disputa no era cuál de los dos modelos resultaba más eficiente. La disputa de fondo era si la bicicleta iba a ser un objeto adaptado al transporte personal o un objeto adaptado para competencias deportivas de velocidad. En el primer caso, el objeto más eficiente era el más seguro, en el segundo caso, el más eficiente era el más rápido. Esta disputa entre dos configuraciones alternativas por el sentido final que se le atribuye a una tecnología queda eclipsada, a la manera de “una historia no contada”, por el “argumento oficial” que lo reduce a una cuestión de mayor eficiencia. Al ponerlo en términos de eficiencia se desarrolla una operación que cumple con al menos dos objetivos. Primero, los intereses que sostienen la preferencia por un determinado objeto quedan objetivados en una categoría de verdad. Segundo, la disputa con las opciones de diseño alternativas, en principio equivalentes en términos valorativos, queda silenciada. Luego de establecer el sentido de la bicicleta como medio de transporte masivo, era

una consecuencia natural, una suerte de profecía autocumplida, que el modelo de dos ruedas de igual tamaño, por su mayor seguridad, fuera considerado el más eficiente.

El ejemplo de la bicicleta es ilustrativo de la forma en que la puja entre dos configuraciones alternativas de diseño, la que privilegiaba la seguridad versus la que privilegiaba la velocidad, queda finalmente vedada luego de que una de ellas se impone y es investida como la más eficiente. El sellado o clausura de la disputa queda formalizado en el código técnico que de esta manera establece las normas para los diseños futuros de un objeto tecnológico. Pero el acto de relegar la disputa por el sentido no resulta meramente anecdótico, como podría pensarse de un objeto doméstico como la bicicleta, ni está exento de consecuencias políticas. Lo que el código oculta puede asumir un carácter político profundo, ya que refleja las relaciones jerárquicas existentes dentro del sistema social vigente. Otros ejemplos resultan particularmente más elocuentes para poner de manifiesto la naturaleza política del código técnico. La organización del proceso de trabajo en una línea de montaje está justificado técnicamente como el modo más rápido y eficiente de disposición de personas y materiales, atendiendo al objetivo de maximizar la productividad. Pero esta disposición de personas y máquinas refleja las jerarquías en las relaciones de producción en el sistema capitalista: la línea de montaje somete al personal a una rígida disciplina y a la desposesión de sus habilidades específicas para el trabajo (Feenberg, 2002). Respecto a la doble función de un dispositivo técnico como la línea de montaje, y en atención a las eventuales críticas desde una perspectiva instrumental de la tecnología, enfocada en las ventajas técnicas inherentes al dispositivo, Feenberg (2002) sostiene:

Por supuesto, las partes de una invención como la línea de montaje tienen una coherencia técnica en sí mismas que de ninguna manera depende de la política o de las relaciones de clase. En este ejemplo, la tecnología no está reducida a las relaciones de producción, ni el conocimiento técnico a la ideología. El primer término de cada uno de estas comparaciones guarda su propia lógica; la tecnología debe realmente funcionar. Pero no simplemente porque un recurso funcione bien va a ser elegido para un desarrollo por sobre muchas otras configuraciones igualmente coherentes de elementos técnicos. Si fuera así, uno podría explicar de la misma manera la elección de cada una de las frases de un discurso [solo] por su coherencia gramatical. El carácter social de

la tecnología no depende de la lógica de su funcionamiento interno sino de la relación de esa lógica con un contexto social (p. 79).

Lo que queda relegado en este caso específico es una organización alternativa para la producción que apunte a expandir antes que a reducir las potencialidades del trabajo humano individual y colectivo. En última instancia, todo el sistema capitalista está justificado a través de una argumentación técnica que Feenberg llama de manera general código técnico del capitalismo. El autor sostiene que “Los requerimientos sociales y técnicos del capitalismo están condensados en una “racionalidad tecnológica” o “régimen de verdad” que hace que la construcción e interpretación de los sistemas técnicos sean acordes a los requerimientos de un sistema de dominación” (Feenberg, 2002: 76). Las elecciones en torno a la configuración de un diseño no surgen entonces desde una supuesta autonomía de la esfera técnica. Más bien responden a un conjunto viable de opciones dentro de lo que se conoce como paradigma o régimen tecnológico. Un paradigma tecnológico es el complejo integrado por conocimientos, prácticas, producciones, infraestructuras e instituciones que conforman la totalidad del universo de la tecnología (Dosi, 1982). De la misma forma que los paradigmas científicos kuhnianos constituyen un régimen demarcatorio de lo que se reconoce como una verdad científica, los paradigmas tecnológicos crean un marco, al interior del cual se define lo que se considera como problema y el tipo de soluciones posibles que se admiten para ese problema. Los paradigmas no son universales, más bien dependen de contextos socioculturales específicos vigentes en cada época histórica. Diferentes paradigmas pueden coincidir o no en lo que se considera un problema y en los criterios y metodologías más adecuados para su resolución. Por ejemplo, el paradigma tecnocrático en el marco del capitalismo pondrá a la eficiencia y el beneficio económico como las premisas más importantes que debe satisfacer una innovación tecnológica. Consecuentemente, las necesidades de una comunidad o grupo social no serán necesariamente consultadas y ocuparán un segundo plano por no considerarse prioritarias. En cambio, un paradigma democrático, sin necesariamente descartar un componente técnico que atienda a la eficiencia, elegirá como premisa esencial garantizar el control de la comunidad sobre una determinada tecnología (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002).

En resumen, el código técnico es una elección técnica que constituye una solución particular adoptada frente a lo que se considera un problema tecnológico. Aunque se presenta en términos objetivos como la opción más eficiente, la elección no es neutral y responde al interés particular de grupos hegemónicos. La solución elegida es solo una posible que ha logrado imponerse por sobre otras alternativas. De esta forma los actores con mayor fuerza establecen patrones técnicos y de sentido que delimitan la estructura y funcionalidad de un objeto y proyectan su posición dominante hacia los diseños futuros del objeto en cuestión. Feenberg llama a esto último autonomía operativa y lo define como “la libertad del propietario o sus representantes de tomar decisiones independientes sobre cómo manejar la producción y la administración de una empresa o institución, al margen de la conveniencia de otros grupos subordinados” (Feenberg, 2002: 75; Feenberg, 2005: 115). En el proceso de diseño, los grupos con mayor autonomía operativa imponen en última instancia una configuración tecnológica que tiende a asegurar la continuidad de su hegemonía. Ahora bien, el carácter frecuentemente oculto del sesgo no permanece invariable. El sesgo en algún momento es revelado como tal y esto ocurre cuando los efectos negativos que producen la imposición de una determinada tecnología generan la resistencia de los grupos sociales afectados y una demanda para su modificación. De esta manera el código técnico puede ser puesto en cuestión, revisado y modificado.

Los códigos técnicos han sido analizados en una diversidad de sistemas socio-técnicos. A manera de ejemplo, podemos citar la educación *online* (Hamilton y Feenberg, 2005), la construcción social de internet (A. Flanagin, C. Flanagin, J. Flanagin, 2010), el tratamiento mediante políticas públicas del mal de Alzheimer (Feenberg, 2017a), entre otros. Uno de los objetivos de este trabajo es analizar el código técnico en los métodos actuales de producción de biocombustibles. Asimismo, se analizarán las posibilidades de la biología sintética para intervenir en este campo particular de la biotecnología. Los biocombustibles son una de las alternativas más relevantes como fuente de energía para reemplazar a los recursos fósiles, en vías de agotamiento (Schmidt *et al.*, 2012; Porcar y Peretó, 2014). Pero antes de concentrarnos en este análisis, se discutirá en forma breve el concepto de código técnico en una aplicación agrobiotecnológica específica, de enorme repercusión e impacto social en las últimas tres décadas: el cultivo de soja genéticamente modificada.

La soja transgénica, denominada soja RR, contiene en su genoma un gen de origen bacteriano que le confiere resistencia al herbicida glifosato (Monsanto, 2001). De esta forma, el herbicida puede usarse entonces de una manera altamente selectiva: no afecta al cultivo pero sí afecta a otras especies consideradas malezas que compiten con la soja por la humedad, los nutrientes del suelo y otros recursos necesarios para las plantas. La inserción del gen bacteriano en el genoma de la planta se efectuó mediante la transferencia de un plásmido a una variedad comercial de soja¹¹. Cada una de las secuencias que constituyen este plásmido, incluido el fragmento específico que confiere la resistencia al herbicida, pueden ser considerados como elementos técnicos, relativamente neutrales en sí mismos. Sin embargo, cuando los fragmentos de ADN son fusionados para conformar el plásmido, y luego este es transferido a la soja, una especie cultivada masivamente como alimento para animales y personas por el alto contenido de proteína de su semilla, la configuración final de todos los elementos técnicos ensamblados pierde su carácter neutral y el diseño tecnológico adopta un sesgo (Feenberg, 2002). En efecto, la incorporación de la resistencia al herbicida a una variedad de soja que retiene este nuevo rasgo de manera permanente, implica la propiedad sobre la semilla de la planta modificada y la utilización de todo un paquete de medidas tecnológicas durante el ciclo de cultivo que son necesariamente complementarias con la utilización de la soja transgénica (Monsanto, 2001). Esto otorga una posición de control al propietario, quien ya de por sí ejercía una posición dominante y contaba con la suficiente autonomía para producir, difundir y comercializar el diseño de manera independiente y de acuerdo a sus propios intereses particulares. De hecho, el uso masivo de la soja RR y de otros cultivos transgénicos ha ocasionado un cambio en el modelo global de producción agropecuaria, de múltiples consecuencias ambientales, so-

¹¹ Los plásmidos son secuencias circulares de ADN presentes en el citoplasma de organismos procariontes como las bacterias. En ingeniería genética los plásmidos se utilizan frecuentemente como vectores para transferir ADN entre distintos organismos. El plásmido PV-GMGT04 se utilizó para transformar la variedad comercial de soja A5403 y así desarrollar la variedad de soja transgénica RR (*Roundup Ready*) (Monsanto, 2001). La soja transgénica contiene en su genoma una secuencia de ADN que expresa la proteína de origen bacteriano CP4 EPSPS (5 enolpiruvilsikimato-3-fosfato sintasa). La proteína CP4 EPSPS es resistente a la inhibición causada por el herbicida glifosato y de este modo, las plantas que expresan esta proteína son tolerantes al herbicida, cuyo nombre comercial es Roundup.

cioculturales y económicas (Pellegrini, 2013)¹². El código técnico de la soja RR se justifica en el mayor rendimiento de la producción del cultivo, el cual lo tornaría indispensable para la alimentación de la población mundial, siempre en continuo aumento. La justificación también hace referencia a los menores costos de producción, e incluso, el menor uso de productos químicos y el menor grado de exposición del suelo a la erosión (Monsanto, 2001). Podría argumentarse además, a tono con una perspectiva instrumentalista, que el diseño constituye una herramienta neutral, una mejora tecnológica que potencialmente beneficia a todo aquel que desee adoptarla. Pero la presunta neutralidad del diseño se disipa al ser introducido en un contexto social específico. Es aquí cuando se revela la función política del artefacto. En la gran mayoría de los casos, los beneficios de la soja RR solo alcanzaron a una minoría que ya contaba con los medios materiales para poder adaptarse al cambio tecnológico que el cultivo modificado implicaba. Por el contrario, el nuevo modelo de producción perjudicó a grandes mayorías a través del daño ambiental, la práctica del monocultivo y el desplazamiento de comunidades de sus lugares de origen por la permanente expansión de la frontera agropecuaria. El diseño consolida un modelo industrial de producción agropecuaria que contribuye a reforzar los beneficios de la empresa y de una minoría que está en condiciones de adoptarlo para su aplicación (Gras y Hernández, 2016). A la vez, tiende a excluir otros modelos agropecuarios que responden a un paradigma tecnológico diferente, centrados en la diversidad de la producción, la preocupación por una distribución equitativa de lo producido, el cuidado de comunidades humanas, la biodiversidad y el ambiente (Otero, 2013).

Con la soja transgénica queda definido un código técnico que apunta a la máxima eficiencia y productividad sin considerar los daños humanos y ambientales que su cultivo ha generado, a través del uso masivo de glifosato y la deforestación sostenida. Sin embargo, este código técnico no necesariamente debería extenderse de manera irrestricta a la técnica de la transgénesis o a toda la biotecnología vegetal. El diseño de una planta transgénica puede tener una perspectiva técnica y social muy diferente al de la soja RR, tal como analiza Pellegrini (2013) en relación al desarrollo de una papa transgénica resistente a virosis.

¹² El desarrollo detallado de los cambios en el modelo agropecuario introducidos por los cultivos transgénicos está más allá de los objetivos de este trabajo. Pellegrini (2013) aborda esta temática en forma integral con abundante bibliografía básica.

El ejemplo de la soja RR contribuye a revelar por qué el diseño tecnológico no constituye un proceso imparcial de naturaleza estrictamente técnica. Por el contrario, revela a la tecnología como un verdadero factor de control y poder. Pero también contribuye a revelar la flexibilidad de los sistemas tecnológicos y la factibilidad para su modificación. La resistencia de los grupos afectados es la vía para la modificación del código técnico vigente en el cultivo de soja (Feenberg, 2002; Feenberg, 2005). Esa resistencia logró que el herbicida glifosato haya sido puesto en consideración y fuera declarado como “probable carcinogénico en humanos” por la Organización Mundial de la Salud (Guyton *et al.*, 2015). Al mismo tiempo Monsanto-Bayer, la empresa propietaria del herbicida y la semilla transgénica, afronta demandas y pagos resarcitorios millonarios, en fallos que señalan al diseño del herbicida como la causa principal del daño producido (Aranda, 2019; Levin, 2019).

En el próximo capítulo analizaremos el código técnico de un sistema tecnológico de producción de biocombustibles a partir de plantas. Se revelará que este sistema presenta varios problemas similares a los expuestos en el caso de la soja transgénica que llevan a cuestionar el diseño adoptado. También examinaremos desde la perspectiva de la teoría crítica en qué medida la biología sintética puede modificar el código técnico actual de producción de biocombustibles y dar una respuesta efectiva al problema de la energía en el planeta.

Capítulo IV. El código técnico de los biocombustibles

En el Capítulo I hemos ensayado una reconstrucción de las características de la biología sintética como nueva disciplina tecnológica, describiendo conceptualmente sus modos de trabajo y la clase de productos que diseña y construye. Luego, en el Capítulo II hemos analizado el estatuto ontológico de estos productos en tanto objetos tecnológicos. La naturaleza de estos objetos se corresponde bien con la de los bioartefactos, una clase particular de organismos vivientes modificados por la acción humana. Los bioartefactos se apartan de los objetos tecnológicos prototípicos debido a que su función responde a un doble origen: por un lado, su naturaleza autopoietica; por otro lado, la intención de un agente externo. En el Capítulo III introdujimos el marco teórico de análisis de la tecnología que ofrece la teoría crítica de Andrew Feenberg. Nos concentramos con particular énfasis en tres conceptos centrales de esta teoría: diseño tecnológico, código técnico e instrumentalización de la tecnología.

En este capítulo procuraremos aplicar los conceptos y los argumentos trabajados en los capítulos anteriores direccionándolos hacia un estudio de caso particular: el diseño tecnológico para la producción de biocombustibles. En la primera parte, detallaremos algunos aspectos técnicos y analizaremos la trayectoria tecnológica de los biocombustibles desde su emergencia en las décadas finales del siglo pasado hasta la actualidad. En la segunda parte, nos enfocaremos en los aspectos de carácter sociotécnico y sostendremos la existencia de un código técnico en el diseño tecnológico predominante en la producción de biocombustibles. A la par, exploraremos los diseños alternativos al vigente actualmente y nos detendremos a examinar las experiencias en curso de la biología sintética para la construcción de un nuevo diseño de producción y las posibilidades de superación del código técnico imperante.

Parte A: Aspectos técnicos de la producción de biocombustibles

4.1. ¿Qué son los biocombustibles?

Al promediar el siglo XVIII la energía se convirtió en un recurso esencial en todas las sociedades industriales. Desde entonces, la fuente natural más barata y abundante de energía han sido los combustibles provenientes de restos fósiles, en la forma de gas, petróleo y carbón. Sin embargo, el consumo continuo y cada vez más intenso de este tipo de combustibles ha transformado el aprovisionamiento de energía en una cuestión sumamente crítica por dos razones. En primer lugar, los combustibles fósiles son un recurso finito y se encuentran próximos a su fase de agotamiento. En segundo lugar, el uso de este tipo de combustible es la causa principal del efecto invernadero, motivada por la emisión de dióxido de carbono y otros gases contaminantes a la atmósfera (Wenz, 2009)¹.

En este escenario, los biocombustibles aparecen como una alternativa tecnológica muy importante para la provisión de energía ya que, en principio, ofrecerían una solución a los problemas derivados del uso de combustibles fósiles. Existen una serie de ventajas relevantes que fundamentan el empleo de esta alternativa: a) los biocombustibles son derivados de material biológico: plantas y potencialmente microorganismos y algas, organismos que podrían ser renovados en forma permanente a través del cultivo; b) los combustibles fósiles son extraídos desde yacimientos, los cuales se sitúan en lugares muy específicos; en cambio, el cultivo de plantas puede, dadas ciertas condiciones básicas, realizarse en lugares muy variados; c) los biocombustibles y los combustibles fósiles líquidos pueden mezclarse para ser utilizados de manera conjunta para

¹ El efecto invernadero se produce cuando los gases y las nubes de la atmósfera absorben la radiación emitida por la Tierra. Esta radiación es a su vez emitida nuevamente, causando un efecto de calentamiento sobre la superficie del planeta y las capas bajas de la atmósfera. Los principales gases que contribuyen al efecto invernadero son, en parte, de origen natural: el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O) el metano (CH₄) y el ozono (O₃). Las actividades antropogénicas, principalmente la producción de energía, los procesos industriales y el transporte también contribuyen al incremento de la concentración de estos gases. Pero además, otros gases que contribuyen al efecto invernadero son de origen enteramente antropogénico. Entre los más importantes se cuentan los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre (IPCC, 2007).

el transporte, el sector de la economía que demanda la mayor parte de la energía. Esto representa una ventaja sobre otras fuentes alternativas de energía, como la electricidad o el hidrógeno ya que, en principio, el empleo de los biocombustibles líquidos más comunes no demandaría cambios sustanciales en la infraestructura instalada, tanto en lo que respecta a su producción como su utilización (Pols y Spahn, 2019).

Los biocombustibles son combustibles obtenidos a partir de una fuente de materia orgánica viviente o de residuos orgánicos de formación reciente denominada biomasa (Palandri, Giner y Debnath, 2019). Esta definición excluye al material embebido en formaciones geológicas y transformado en restos fósiles. La biomasa es utilizada para la fabricación de biocombustibles líquidos y gaseosos; estos últimos, considerablemente menos utilizados a nivel global, no serán considerados en detalle en este trabajo. En el año 2018 la energía total producida en el planeta alcanzó los 14,3 Mtoe (megatoneladas equivalentes de petróleo); los combustibles fósiles y los biocombustibles representaron un 81,3% y 9,3% de ese valor, respectivamente. En ese mismo año, los biocombustibles líquidos, utilizados mayoritariamente para el transporte, cubrieron el 3,7% de la demanda total de energía del sector (IEA, 2020).

Los biocombustibles más importantes por su volumen de producción son el bioetanol y el biodiésel, tal como se denomina al etanol y al diésel obtenido a partir de fuentes biológicas. Para 2020 se ha estimado que la producción global de bioetanol y biodiésel alcanzará los 130 y 35 billones de litros, respectivamente (FAO, 2019). Ambos biocombustibles pueden ser utilizados directamente como fuente de energía para el transporte o bien pueden ser mezclados con los combustibles fósiles para ser utilizados con el mismo fin (Schmidt *et al.*, 2012).

Si bien desde sus inicios la agricultura ha sido una actividad esencialmente orientada a la producción de alimentos, también es milenaria su utilización como fuente de diversas clases de bienes. La agricultura ha proporcionado la materia prima para la fabricación de fibras, remedios y materiales de construcción, entre otros. Respecto a los biocombustibles, existen antecedentes desde los inicios del siglo XX del empleo de plantas como fuente de energía para el transporte. Sin embargo, es entre las últimas tres décadas del siglo pasado y la primera década del siglo XXI, el período en que la producción de biocombustibles a partir de plantas se generaliza en varios países, alentada a través de diferentes iniciativas estatales y privadas (Shortall, 2019; Palandri *et al.*, 2019).

La materia prima para la fabricación de biocombustibles es diferente según se trate de bioetanol o biodiésel. El bioetanol se obtiene principalmente a partir de maíz (60% de la producción total) y caña de azúcar (25% de la producción total). El grano de trigo y la remolacha azucarera también son fuente de bioetanol aunque en una proporción bastante menor. El sustrato químico para la fabricación de bioetanol es el almidón almacenado en los granos de maíz y trigo y la sacarosa contenida en el tallo de la caña de azúcar y en la raíz de la remolacha azucarera. La extracción industrial de estas moléculas orgánicas es relativamente sencilla y barata (Debnath, 2019). Su posterior tratamiento con enzimas y microorganismos libera las unidades de glucosa a partir de las cuales se obtiene por fermentación el bioetanol, producto final del proceso industrial. Por otro lado, los aceites contenidos en la semilla de soja (30% de la producción total), palma (25% de la producción total) y colza (18% de la producción total) constituyen las principales fuentes de materia prima para la fabricación de biodiésel, el cual es obtenido a partir de una reacción química relativamente sencilla denominada transesterificación (FAO, 2019; Debnath, 2019).

De acuerdo a la fuente y al proceso de transformación de la materia prima, los biocombustibles suelen clasificarse como de primera, segunda, tercera y cuarta generación (Aro, 2016; Callegari *et al.*, 2020). Actualmente, la mayor parte del bioetanol y el biodiésel se obtienen a partir de plantas que son también cultivadas como alimentos para personas o animales; estos son los llamados biocombustibles de primera generación. Como se examinará más adelante, este proceso tecnológico es objeto de múltiples controversias; sin embargo, aún cuando existen formas alternativas de producción, la gran mayoría de los biocombustibles se generan mediante esta modalidad (Debnath, 2019).

Los biocombustibles de segunda generación son derivados de plantas o partes de plantas que no son utilizadas para la alimentación. También se denominan lignocelulósicos ya que provienen de la lignina y la celulosa, compuestos naturales de origen vegetal que se cuentan entre los más abundantes del planeta. Aproximadamente el 70% de la biomasa lignocelulósica está conformada por azúcares que pueden transformarse en etanol mediante fermentación (Mortimer, 2019). En este grupo se incluye también a plantas específicamente cultivadas para la producción de energía, como es el caso de *Miscanthus* o *Jatropha* y a los residuos de origen agrícola, forestal o urbano (Schmidt *et al.*, 2012; Acheampong *et al.*, 2016).

Los biocombustibles de tercera generación utilizan algas marinas como materia prima para la obtención de energía. Las algas son organismos unicelulares, fotosintéticos, capaces de almacenar grandes depósitos de lípidos (grasas y aceites) que son utilizados como sustrato para la fabricación de biodiésel y también de bioetanol. En la actualidad su utilización todavía es marginal con respecto a los biocombustibles producidos a partir de plantas, principalmente por el costo económico y por problemas técnicos relacionados con la cosecha y el desalado. Sin embargo, una serie de ventajas respecto a los aspectos más problemáticos de los biocombustibles de primera y segunda generación hace de las algas una alternativa de gran importancia para la producción futura de energía. Algunas clasificaciones también incluyen en los biocombustibles de tercera generación a los cultivos de plantas modificadas mediante ingeniería genética con el objetivo de producir energía. Por ejemplo, una planta de maíz a la cual se le ha incorporado una enzima que permite la conversión de una parte del residuo de la cosecha en glucosa, sustrato apto para la fabricación de bioetanol mediante fermentación. Otros ejemplos de plantas modificadas con ese fin son el álamo y el sorgo (Acheampong *et al.*, 2016).

Los biocombustibles de cuarta generación, también llamados biocombustibles de avanzada, están basados en la producción de nuevas clases de combustible mediante el empleo de organismos diseñados por técnicas de biología sintética. Se trata de un campo nuevo en activa experimentación que todavía no ha generado volúmenes de producción en el nivel industrial. Idealmente, se procura que los microorganismos diseñados a través de esta metodología sean capaces de utilizar una materia prima de tipo lignocelulósico (Peralta Yahya, *et al.*, 2012; Schmidt *et al.*, 2012). O bien, en una versión aún más sofisticada, organismos fotosintéticos que funcionen como fábricas vivientes o biofactorías, convirtiendo directamente la energía solar en biocombustible (Aro, 2016). A menudo los llamados electrobiocombustibles, obtenidos por la combinación de microorganismos y células fotovoltaicas, también son incluidos dentro de los combustibles de cuarta generación.

4.2. Emergencia y evolución histórica de la producción de biocombustibles

El empleo de plantas como biocombustibles para el transporte ha sido

reportado desde comienzos del siglo XX. Por ejemplo, el motor diésel fue ensayado inicialmente en 1900 con combustible obtenido de aceite de maní. Durante las décadas de 1920 y 1930 también se realizaron diversas pruebas empleando bioetanol como combustible para el transporte. Sin embargo, estos ensayos fueron hechos aislados, concretados por la iniciativa individual y sin que existiera ninguna política específica para estimular la producción a nivel industrial (Shortall, 2019). A partir de la década del 70, comienza la producción industrial y la paulatina formación de un mercado de biocombustibles que atraviesa por distintos períodos, cuyas características se detallan a continuación (Schmidt *et al.*, 2012; Palandri *et al.*, 2019)².

4.2.1. Los comienzos de la industria de los biocombustibles

La crisis desatada durante los años 70 motivada por las restricciones impuestas por los países productores de petróleo, impulsó a los países más industrializados a buscar una fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. Hasta ese momento la producción de biocombustibles era todavía muy incipiente y aleatoria, dependiendo mayoritariamente de los precios del petróleo; cuando estos disminuían, también disminuía el interés en la producción de biocombustibles. Por el contrario, los aumentos en el precio del petróleo volvían la atención sobre las fuentes alternativas de producción de energía. En 1973, aproximadamente el 86% de la energía total utilizada en el planeta provenía de combustibles fósiles (Schmidt *et al.*, 2012). En 1975 se inicia la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar en Brasil, primer país en implementar políticas para el desarrollo de un mercado de biocombustibles. El Estado lanzó un programa de medidas que incluía subsidios a la producción de bioetanol, reducción de impuestos para su venta y la obligación de un “corte” (*blending*) con un 4.5% de bioetanol en el combustible convencional utilizado para el transporte. Este porcentaje fue elevado hasta el 22% en 1979, cuando se produjo un nuevo incremento en el precio del petróleo (Palandri *et al.*, 2019). Si bien el programa original, denominado ProÁlcool, comenzó a ser paulatinamente cancelado en los años 90, la producción de bioetanol continúa activa en Brasil. Este país con-

² La evolución del mercado y la política económica de los biocombustibles puede consultarse con más detalle en Nuffield Council on Bioethics (2011), Buraschi (2014) y FAO (2019).

centra actualmente el 25% de la producción total, solo por detrás de Estados Unidos que concentra el 47% de la producción mundial (Palandri *et al.*, 2019).

En los años 90, Estados Unidos, Canadá, Australia y varios países de la Comunidad Europea también comenzaron a desarrollar políticas estatales activas cuyas principales medidas consistían en la excepción de impuestos, fijación de precios mínimos y establecimiento de créditos y subsidios especiales a la producción de biocombustibles. Al igual que en Brasil, se impuso el agregado de diferentes porcentajes de bioetanol en el combustible de origen fósil empleado para el transporte. Estados Unidos se convirtió rápidamente en el máximo impulsor del mercado global de bioetanol, concentrando aproximadamente la mitad de la producción total. La gran mayoría de esta producción provenía del grano de maíz (Palandri *et al.*, 2019).

4.2.2. La consolidación de un mercado global

A partir de los años 2000 las medidas económicas destinadas al estímulo de la producción fueron profundizadas y la industria de los biocombustibles, ya activa en los países industrializados, se expandió rápidamente a varios países en desarrollo. En estos países las políticas estatales activas garantizaron la producción continua más allá de las oscilaciones del precio del petróleo, contribuyendo así a la consolidación de un mercado global para los biocombustibles. En Asia, principalmente en Malasia e Indonesia, se impulsaron planes piloto para el estudio de las necesidades de infraestructura para la producción. Lo mismo ocurrió en varios países de Latinoamérica donde se alentó la producción con el objetivo de generar excedentes para la exportación hacia los países más industrializados (Palandri *et al.*, 2019).

Los números reflejan el abrupto crecimiento de la producción alcanzado en esta etapa. Entre el año 2000 y 2007, el incremento en la producción global de bioetanol y biodiésel fue de 3 y 11 veces, respectivamente. La producción de bioetanol en Estados Unidos creció más de 7 veces entre 1990 y 2007, año en que el crecimiento comenzó a desacelerarse (Carolan, 2010). Aún así, en el año 2007 el 81% de la energía total consumida en todo el planeta tenía su origen en los recursos fósiles. En el año 2015, los biocombustibles representaban el 4% de la energía utilizada para el transporte. Por otra parte, se estima que para

2060, la bioenergía aportará un 17% de la demanda total de energía en el planeta (Schmidt *et al.*, 2012; Debnath, 2019).

4.2.3. Las restricciones a los biocombustibles convencionales

Sobre el final de la primera década del siglo XXI se produce un cambio muy significativo en la producción y la comercialización de biocombustibles. El optimismo inicial en torno a esta tecnología cayó por una serie de factores que expusieron serios problemas en el diseño del sistema de producción y motivaron un fuerte freno a la expansión de la década anterior. Estos factores fueron: a) el desvío de la producción de plantas regularmente cultivadas para alimentación hacia la fabricación de biocombustibles; b) el uso alternativo del suelo usualmente destinado a cultivos para la producción de alimentos, el cual fue orientado hacia la producción de biocombustibles; c) las consecuencias sociales y biológicas motivadas por la producción intensiva de biocombustibles. El primero y el segundo factor contribuyeron a comprometer fuertemente la seguridad alimentaria global de sectores populares en varios países. El tercer factor reveló los riesgos ambientales y las consecuencias sociales de la expansión de la frontera agrícola (Pols y Spahn, 2019; Shortall, 2019).

A partir del marco de análisis que propone la teoría crítica de la tecnología, sostendremos que estos factores revelan la puesta en crisis de un código técnico implicado en el diseño de producción de biocombustibles convencionales (Feenberg, 2005). Los tres factores se tratan en detalle en el siguiente apartado de este capítulo. A partir de estas controversias, varias organizaciones y agencias internacionales solicitaron la reducción de las políticas de estímulo a los biocombustibles y la reconsideración de los objetivos de su producción. Jean Ziegler, el relator especial para las Naciones Unidas de la Organización *Right to Food* calificó a los biocombustibles de primera generación como un “*crimen contra la humanidad*”, desde que la producción de los mismos amenazaba con limitar seriamente el derecho básico de acceso a la alimentación (Pols y Spahn, 2019: 275). En general, las restricciones aplicadas apuntaron a limitar la producción de los biocombustibles convencionales y estimular la producción a partir de otras fuentes de biomasa. Por ejemplo, la Comunidad Europea impuso en 2015 un tope de 7% en el uso de biocombustibles convencionales. Esto representaba “un corte del corte” ya que sobre los combustibles fósiles regía una imposición previa de corte

con 10% de biocombustibles convencionales. El dato no es solamente anecdótico; sobre el 3% remanente para completar el volumen total de biocombustibles requerido comenzó a considerarse la inclusión de los biocombustibles de segunda generación o directamente en otras formas de energía, como la electricidad. No se trataba solamente de aplicar un porcentaje de corte con cualquier biocombustible en general sino con un biocombustible cuyo proceso de producción resultara menos lesivo y contaminante. Por ejemplo, el bioetanol obtenido de la caña de azúcar genera menos emisiones de dióxido de carbono que el generado a partir del grano de maíz o trigo (Schmidt *et al.*, 2012; Shih, 2018). Otras medidas de restricción apuntaron directamente a la flexibilización de los porcentajes de corte de los combustibles fósiles, la suspensión de las políticas de exención impositiva a la producción y la exigencia a los países exportadores de mayor control en las condiciones de producción (Schmidt *et al.*, 2012; Palandri *et al.*, 2019). Al presente, existe una gran incertidumbre en torno al futuro de los biocombustibles convencionales, contemplándose incluso la posibilidad de su prohibición en algunos países (Aro, 2016). Las expectativas originalmente colocadas sobre ellos para reemplazar a los combustibles de origen fósil han virado hacia otros tipos de biocombustibles, o incluso hacia otras formas de obtención de energía.

4.3. Estrategias metodológicas de la biología sintética para la producción de biocombustibles de cuarta generación

Los biocombustibles de cuarta generación, también llamados biocombustibles de avanzada, comenzaron a ser considerados hace poco más de una década en coincidencia con la retracción de los biocombustibles convencionales³. Aunque casi la totalidad de los proyectos en curso para diseñar organismos productores de combustible se encuentran en una

³ Esta denominación puede introducir cierta confusión ya que los biocombustibles de primera, segunda y tercera generación son clasificados de esta forma en función de la materia prima o biomasa utilizada para la producción de bioetanol o biodiésel. En cambio, la expresión biocombustibles de cuarta generación se refiere generalmente a los biocombustibles obtenidos a partir de diversos organismos modificados mediante técnicas de biología sintética, *independientemente* de la biomasa que se utilice para la producción de energía (Aro, 2016). A veces, el término también puede referirse a una modificación por ingeniería genética de la propia biomasa utilizada para producir el biocombustible (Shih, 2018; Mortimer, 2019). En este trabajo, biocombustibles de cuarta generación y biocombustibles de avanzada se emplean de manera indistinta como sinónimos.

fase de experimentación y a escala de laboratorio, los antecedentes previos de producción de biocombustibles han creado un marco que opera como un código técnico establecido (Feenberg, 2005). Como veremos enseguida, estos antecedentes condicionan las innovaciones posibles, aún en una disciplina como la biología sintética, cuyos promotores siempre enfatizan la capacidad potencialmente extraordinaria para diseñar organismos que superen los límites impuestos por la naturaleza y abran las puertas para la obtención de nuevas formas de energía.

De manera ideal, la producción de un biocombustible de cuarta generación mediante biología sintética debería satisfacer los siguientes requisitos: a) no depender o comprometer a los cultivos utilizados como alimento; b) no aumentar la superficie de uso del suelo; c) liberar a la atmósfera una cantidad considerablemente menor de los gases que contribuyen al efecto invernadero (dióxido de carbono, óxido nitroso y metano, principalmente); d) no afectar la biodiversidad; e) demandar para su fabricación bajas cantidades de energía. Adicionalmente, se procura un biocombustible con alta densidad energética y una serie de propiedades físicas que permitan el reemplazo, en la forma más efectiva posible, de los combustibles líquidos de origen fósil utilizados para el transporte. Entre las propiedades más importantes a tener en cuenta en la calidad de un biocombustible se destacan la densidad energética, la calidad de la combustión y la ignición, la estabilidad química, el olor, la toxicidad, la viscosidad y la tendencia a mezclarse con agua. La búsqueda de una fuente capaz de proveer este tipo de biocombustible se orienta hacia microorganismos y plantas que puedan ser modificados de múltiples formas por técnicas de biología sintética; por ejemplo, a través del rediseño de organismos existentes mediante la introducción de genes aislados o grupos de genes que forman parte de rutas metabólicas (Peralta-Yahya *et al.*, 2012).

Uno de los objetivos principales de la biología sintética en el campo de los biocombustibles consiste en mejorar el rendimiento y la productividad de los procesos biológicos para producir energía en cantidades suficientes para el nivel de consumo industrial actual. Se procura que los organismos modificados puedan funcionar no solo como productos sino también como auténticas refinerías vivientes, de modo tal que sinteticen compuestos con características similares a las de los derivados del petróleo, listos para ser utilizados como biocombustibles (*drop-in fuels*) (Zargar, Bailey, Haushalter, Eiben, Katz *et al.*, 2017).

Otro de los objetivos que se plantea la biología sintética es mejorar la calidad de los biocombustibles que son utilizados actualmente. Desde hace décadas, el bioetanol obtenido a partir de plantas ha sido el biocombustible más utilizado para reemplazar a la nafta (gasolina). El bioetanol es producido mediante procesos de fermentación natural llevado a cabo por microorganismos anaeróbicos, principalmente levaduras. Sin embargo, las propiedades del etanol como combustible no son superiores a las de otros alcoholes, como el butanol o el isobutanol, que también podrían eventualmente reemplazar a la nafta. El etanol tiene un 70% de la energía de una cantidad equivalente de nafta, tiende a absorber agua que favorece la corrosión de motores y cañerías de escape y su destilación consume una importante cantidad de energía. Igualmente, el biodiésel se produce por una reacción química de transesterificación de los aceites vegetales o las grasas animales, con metanol. Pero sus cualidades son inferiores a las del diésel D2 obtenido a partir de petróleo. El biodiésel tiene un 91% del contenido energético de una cantidad equivalente de diésel D2 y tiene tendencia a formar ceras a bajas temperaturas, lo que dificulta considerablemente su capacidad de transporte (Peralta-Yahya *et al.*, 2012).

Por ser sistemas biológicos considerablemente más sencillos, los proyectos de biología sintética se han focalizado en microorganismos antes que en plantas. Sin embargo, los microorganismos mejor conocidos y más utilizados hasta el momento en los procesos industriales son heterótrofos; esto es, dependen de una fuente externa de carbono o biomasa para crecer y producir biocombustibles. Hasta el momento, la mayoría de los biocombustibles de cuarta generación o con potencial capacidad para suplir al bioetanol o al biodiésel, son producidos a partir de biomasa que contiene almidón, sacarosa o lignocelulosa como fuente de carbono. Como veremos en el apartado siguiente de este capítulo, en cualquiera de estas tres posibilidades subsisten una serie de problemas propios de los procesos de producción de biocombustibles de primera y segunda generación. En consecuencia, aún cuando se alcance un mayor rendimiento en el proceso de obtención y una disminución en la emisión neta de CO₂ (dióxido de carbono), la estrategia de obtención de biocombustibles avanzados mediante la bioingeniería microbiana no resuelve en principio los problemas derivados de la utilización de plantas como fuente última de provisión de energía (Peralta-Yahya *et al.*, 2012).

Las plantas también constituyen un objetivo estratégico para la pro-

ducción de biocombustibles de avanzada. Por su condición de autótrofos, las plantas son organismos con capacidad para fijar y almacenar carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis. En el proceso fotosintético, la energía solar capturada se transforma en energía química, en la forma de moléculas orgánicas. Estas moléculas conforman la estructura y sostienen el funcionamiento de los organismos fotosintéticos. En este sentido, al ser independientes de una fuente de carbono externa, las plantas pueden ser aún más eficaces que los microorganismos para establecer una bioeconomía que reemplace los combustibles fósiles y los procesos petroquímicos (Shih, 2018).

4.3.1. *Microorganismos productores de biocombustibles*

Existen microorganismos con la capacidad potencial de producir de manera natural compuestos que podrían convertirse en sustitutos eficaces del bioetanol o el biodiésel (Fortman *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2012; Peralta-Yahya *et al.*, 2012; Porcar y Peretó, 2014). Entre estos compuestos se cuentan: a) los alcoholes de cadena corta; b) los isoprenoides o terpenos; c) los derivados de ácidos grasos; y d) los policétidos. Por ejemplo, los alcoholes de cadena corta, tales como el butanol, el propanol y el isobutanol pueden reemplazar a la nafta, y aún exhiben mejores propiedades que el etanol para cumplir esa función. Los isoprenoides y sus derivados alcoholes, como el isopentanol, también son potenciales sustitutos de la nafta. Otros derivados, como el farnesano y el bisabolano pueden sustituir al diésel mientras que los dímeros de pineno y el limoneno, por su bajo punto de congelación y su alto contenido energético son eficaces sustitutos para el combustible de aviones. El farnesano es utilizado como “plataforma química” ya que, además del biodiésel, puede utilizarse para la fabricación de una variada colección de materiales para la industria farmacéutica y de la alimentación (George *et al.*, 2014; Mackenzie, 2014). Algunos derivados de ácidos grasos también son adecuados para sustituir al diésel, por ejemplo los alcanos (componentes principales del diésel), alquenos, alcoholes grasos y metil y etil ésteres de ácidos grasos. Finalmente, los policétidos son polímeros de acetilo y propionilo potencialmente versátiles, aunque mucho menos explorados, para la producción de biocombustibles (Peralta-Yahya *et al.*, 2012; Zargar *et al.*, 2017).

Para la obtención de los compuestos mencionados en un nivel de rendimiento apropiado, la biología sintética recurre en general a una

producción de tipo heteróloga del biocombustible, en la cual una parte de una vía metabólica de un determinado microorganismo es incorporada y adaptada en microorganismos modelo, tales como la bacteria *Escherichia coli* o la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Estos organismos tienen la ventaja de crecer más rápido y tolerar mejor los inhibidores que se encuentran en la biomasa o en los propios subproductos que ellos generan en el proceso de fermentación. Cada uno de los componentes enzimáticos de esas rutas metabólicas son modificados individualmente de manera de maximizar su actividad y su nivel de expresión. Por ejemplo, la caña de azúcar es una biomasa apropiada para la obtención de biodiésel a partir de levaduras modificadas. La reingeniería de varios genes de la vía del mevalonato y su posterior introducción en levaduras, permitió la obtención de biodiésel a partir del isoprenoide farnesano. Este trabajo fue realizado en el laboratorio dirigido por Jay Keasling, quien también fue capaz de sintetizar artemisinina, un compuesto utilizado como remedio para combatir la malaria, en la bacteria *Escherichia coli*. Esta producción está considerada hasta el momento el logro más importante desde el punto de vista comercial de la biología sintética (Martin *et al.*, 2003; Mackenzie, 2013).

Para superar los problemas que implican la producción de biomasa a partir de plantas, una alternativa a la cual se le ha asignado especial importancia es el empleo de cianobacterias fotosintéticas, como *Synechococcus*. Estos microorganismos pueden producir butanol a partir del CO₂ atmosférico capturado por fotosíntesis (Savakis, 2015). La bioingeniería de organismos fotosintéticos apunta a la producción de biocombustibles de alta calidad y a la excreción del mismo al exterior de la célula; esto último permitiría su recolección directa en biorreactores. Con un diseño de estas características, no sería necesaria la producción de biomasa para la obtención de energía; los microorganismos actuarían aquí solo como intermediarios o catalizadores de la conversión de CO₂ en biocombustibles (Mackenzie, 2013; Aro, 2016)⁴. Utilizando como alternativa la producción directa a partir de microorganismos fotosintéticos, la eficiencia en la conversión de energía solar en energía en la forma de bioetanol podría alcanzar un valor de 10% (Aro, 2016). Este valor es muy significativo teniendo en cuenta que el bioetanol obtenido

⁴ Aunque este diseño aparece como muy lógico y apropiado, por diversas razones aún no ha podido concretarse. Joule Unlimited Co, la principal compañía que lo impulsaba, canceló el proyecto y cerró sus puertas en 2017.

a partir de caña de azúcar, el método actual más eficiente de producción a partir de plantas, tiene una eficiencia de 0,16% (Gouveia, 2011; Shih, 2018). Todos estos proyectos se encuentran en una escala de laboratorio, el salto a la producción industrial supondrá la competencia efectiva con los métodos de producción tradicionales y su infraestructura instalada. La escala industrial supone un aumento aproximado de un millón de veces en tamaño respecto a la escala del laboratorio. Entre los biocombustibles de avanzada, solo la producción de biobutanol y bioisobutanol, la cual puede adaptarse con relativa facilidad a la infraestructura instalada para producir bioetanol, tiene actualmente perspectivas futuras de comercialización (Peralta-Yahya *et al.*, 2012).

4.3.2. Plantas y organismos fotosintéticos productores de biocombustibles

Existe una perspectiva de la biología sintética que fundamenta la adopción de la bioeconomía como una suerte de retorno a la función original concebida para las plantas. Desde la Antigüedad, los requerimientos de alimento, materiales y energía eran tradicionalmente cubiertos por la agricultura. A partir de la revolución industrial, el carbón en primer lugar y más tarde los procesos petroquímicos, suministraron una fuente de energía barata y altamente eficaz. La agricultura se enfocó entonces en la producción de alimentos para humanos y animales. Una posible solución a la dependencia extrema de los combustibles fósiles es la bioeconomía, un tipo de producción basada en organismos biológicos como fuentes renovables para la producción de energía. En el caso de las plantas, la bioeconomía recuperaría las funciones ancestrales de la agricultura, incluida el suministro de energía. Desde luego no se plantea la agricultura en términos tradicionales, sino más bien de una versión altamente modificada en base a las potencialidades de la biología sintética. Posiblemente uno de los objetivos más ambiciosos de la biología sintética vegetal es la conversión de plantas en factorías de energía o biorrefinerías. Antes que productoras de biomasa, se busca que las plantas produzcan de manera *directa* o *in planta* los biocombustibles, de manera similar a como se proyecta el empleo de bacterias fotosintéticas para la obtención de energía. Dada la escala masiva de la agricultura, la utilización de plantas como biofactorías permitiría pensar los procesos industriales en términos de hectáreas antes que en términos de litros (Shih, 2018).

Por el momento, las estrategias en desarrollo más avanzadas todavía conciben a las plantas como productoras de biomasa y apuntan a un mejor aprovechamiento de su contenido lignocelulósico. Mediante diferentes técnicas de biología sintética se busca alterar la síntesis de lignina, a fin de disminuir su contenido total en la planta o de volver más lábil su unión a la celulosa. El menor contenido de lignina, polímero natural altamente insoluble, facilitaría el proceso de extracción y procesamiento químico de la celulosa, el polisacárido específicamente utilizado como sustrato para la fabricación de biocombustible mediante fermentación. Otra estrategia consiste en la modificación de la composición de azúcares del sustrato lignocelulósico, compuesto en un 40% por celulosa (polisacárido formado por azúcares de 6 carbonos), 30% de hemicelulosas y pectinas (polisacáridos formados por azúcares de 5 carbonos) y 30% de lignina, un polisacárido complejo cuyo procesamiento industrial es más difícil y costoso debido a su gran insolubilidad (Rubin, 2008). Se busca aumentar el contenido de azúcares de 6 carbonos, sustrato preferencial para los procesos de fermentación, a expensas de los azúcares de 5 carbonos, cuyo aprovechamiento es menos eficiente. Cuando las dos estrategias arriba mencionadas se combinan en *Arabidopsis*, una planta modelo para la experimentación en el laboratorio, el porcentaje de azúcares fermentables aumenta hasta en un 73% (Mortimer, 2019).

Más allá de la producción específica de biocombustibles, la biología sintética también concibe a las plantas como auténticas plataformas, orientadas a la producción de una serie de moléculas estructurales básicas que actualmente se obtienen a partir de combustibles fósiles. Algunas de estas moléculas, como el ácido mucónico o los polihidroxicanoatos (precursores de plásticos, acrílicos, nailon y poliésteres), han sido obtenidas a partir de microorganismos modificados aunque su producción todavía limitada la vuelve económicamente poco competitiva. Una alternativa entonces, es la producción masiva a través de la agricultura, mediante la introducción de enzimas bacterianas en plantas. De esta manera podría obtenerse biomasa para la producción de biocombustibles con un valor agregado de sustancias que constituyen la materia prima para la producción de otros materiales (Mortimer, 2019).

Parte B: Aspectos sociotécnicos de la producción de biocombustibles

4.4. El código técnico de los biocombustibles

En el Capítulo III se discutió el concepto de código técnico, que Feenberg desarrolla en buena parte de su obra (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002; Feenberg, 2005; Feng y Feenberg, 2008; Feenberg, 2017b). Este concepto se estructura a partir de una serie de elementos característicos que pueden ser discriminados analíticamente. Estos elementos son: 1) un diseño predominante o hegemónico⁵, justificado como la solución más eficiente de un determinado problema técnico; 2) un interés o sesgo inherente al diseño predominante; 3) la demanda y reclamo de diversos sectores de la sociedad que cuestionan el diseño tecnológico a partir de los efectos perjudiciales derivados de su aplicación, esto es, la resistencia para desafiar el código técnico predominante; 4) una serie de configuraciones o diseños alternativos al diseño predominante, que se visibilizan como resultado del reclamo de los actores subordinados. En lo que sigue, analizaremos cómo se presentan cada uno de estos elementos en la tecnología actual para la producción de biocombustibles. Luego, como parte de los diseños alternativos al sistema de producción vigente, nos detendremos en forma particular en las perspectivas de desarrollo de los biocombustibles a través de la biología sintética.

4.4.1. El diseño predominante

Cuando se analiza la justificación racional que sostuvo el diseño predominante en la producción de biocombustibles, es posible distinguir factores de orden político, ambiental, económico y técnico (Pols y Spahn, 2019). Entre los factores de orden político se contaban cuestiones relacionadas con la soberanía y la independencia de los estados nacionales.

⁵ Por hegemonía se entiende aquí el predominio de un tipo de racionalidad que no necesita ser impuesta a través de una lucha abierta entre diferentes agentes. Más bien se acepta y reproduce irreflexivamente, a través de prácticas y conceptos naturalizados en la sociedad (Feenberg, 1999: 86-87; Feenberg, 2002: 75). El diseño de producción de biocombustibles convencionales se reveló como una verdadera hegemonía tecnológica ya que no solo se justificaba en cuestiones técnicas sino en una serie de valores mucho más amplios y fuertemente arraigados en la sociedad, como el cuidado del planeta y la soberanía energética.

Los factores de orden económico incluían la necesidad de disponer de un recurso energético renovable que permitiera el sostenimiento de la actividad productiva. Entre los factores ambientales se consideraron la contaminación atmosférica y el calentamiento global producido por el efecto invernadero. Finalmente, las cuestiones de orden técnico se refirieron a la utilización de un sistema de producción agrícola-industrial de procedimientos conocidos y que ofrecía la posibilidad de aprovechar la infraestructura instalada. Estos factores no son independientes ni tienen una línea demarcatoria precisa sino que están interrelacionados y en conjunto crean el contexto general de justificación del modelo tecnológico adoptado. Consideraremos con más detalle la contribución de cada uno de ellos.

Factores políticos. La seguridad en materia energética es un concepto básico para cualquier país que pretenda ser soberano y económicamente independiente. Siendo los combustibles un recurso estratégico para el desarrollo, la disponibilidad de una fuente de energía renovable, alternativa a los combustibles fósiles, podría liberar a los países importadores, al menos en parte, de la dependencia de los países productores (Thompson, 2008a).

Factores ambientales. Los combustibles fósiles, la fuente de energía utilizada desde el inicio de la Revolución Industrial, tienen un carácter finito. De manera inevitable se ingresará a una fase de agotamiento de las reservas lo que hace de estos recursos un bien escaso y con crecientes costos de extracción. Si el objetivo hacia el futuro es sostener el crecimiento de la actividad industrial, se vuelve necesario encontrar una fuente alternativa que garantice la producción de energía de manera renovable. Por otra parte, el uso de combustibles fósiles es la principal causa del cambio climático, caracterizado por el *efecto invernadero* y el consecuente calentamiento global de la superficie terrestre (Lever-Tracy, 2019). Este fenómeno se produce principalmente por la continua emisión a la atmósfera de dióxido de carbono y otros gases contaminantes durante el “ciclo de vida” completo del combustible, desde su extracción hasta su utilización final⁶. Potencialmente, las altas emisiones de dióxido de carbono producidas por la quema de combustibles fósiles serían mitigadas mediante el empleo de biocom-

⁶ En 1750, al comienzo de la Revolución industrial, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera era de 280 partes por millón. En la actualidad alcanza las 417 partes por millón, lo que representa un aumento del 67% (UCSD, 2021).

bustibles. Se asume que el dióxido de carbono total emitido a la atmósfera, desde el inicio del proceso de producción hasta la utilización final del biocombustible, es aproximadamente igual al dióxido de carbono secuestrado de la atmósfera y almacenado mediante el proceso de fotosíntesis por la biomasa empleada como materia prima para la fabricación del biocombustible. De esto resulta que el balance final entre el dióxido de carbono fijado desde la atmósfera y el dióxido de carbono emitido hacia la atmósfera, resulta neutro o bien se aproxima a esa condición (Thompson, 2008a).

Factores económicos. Las políticas estatales de apoyo económico fueron decisivas para estimular la producción y garantizar el beneficio económico, a través de medidas como los precios mínimos o la obligatoriedad de un determinado porcentaje de uso de biocombustibles en el sector de transportes. Se impuso entonces un modelo tecnológico de producción basado en la agricultura intensiva que garantizaba una relación óptima entre beneficios y costos. Desde un punto de vista económico y técnico, la forma más rápida y eficiente para producir biocombustibles resultó ser la utilización de plantas como el maíz, la caña de azúcar y la soja. Estos son los motivos, a la par del todavía escaso desarrollo de las opciones alternativas, por el cual la producción de biocombustibles se inicia a partir de especies usualmente cultivadas para la alimentación tanto humana como animal (Palandri *et al.*, 2019; Debnath, 2019).

Factores técnicos. Se recurrió al uso de materia prima a partir de cultivos tradicionales, con técnicas de manejo bien establecidas. El diseño implementado aprovechó los conocimientos en la producción de cultivos con alto rendimiento basado en el uso masivo de insumos químicos. Lo mismo ocurrió con el aprovechamiento de la capacidad material instalada, relativamente sencilla, para el procesamiento industrial de la materia prima vegetal. Especies cultivadas en grandes superficies, como el maíz, el trigo y la caña de azúcar, permiten la obtención rápida y con menores costos de carbohidratos y azúcares, sustratos biológicos para el crecimiento de levaduras que, mediante procesos de fermentación, producen el bioetanol. Una situación similar explica la adopción de la soja para la extracción de aceite, insumo necesario para la producción de biodiésel (Palandri *et al.*, 2019; Debnath, 2019).

Desde el inicio de su producción en forma sistemática, los biocombustibles fueron promocionados como una tecnología capaz de solucio-

nar en forma simultánea los tres problemas principales sobre el aprovisionamiento de energía expuestos más arriba: la cuestión de la soberanía energética, el reemplazo del recurso fósil no renovable y la disminución de la contaminación ambiental. El diseño tecnológico predominante se sostiene mediante un discurso con una cuidadosa fundamentación racional del problema, basada en la sustentabilidad económica, la preservación ambiental y la independencia y la seguridad nacional. Se trata de valores universales con potencia suficiente para convocar a un consenso y apoyo masivo. Los fundamentos esgrimidos presentan a la producción de biocombustibles como un reclamo global y urgente desde un punto de vista ambiental, aspecto necesariamente compartido de manera unánime en todas las sociedades puesto que se trata de la preservación del planeta que habitamos. Al estructurarse mediante una apelación a la defensa de un bien común, el discurso tiende a dejar de lado la consideración de cualquier posible conflicto entre grupos beneficiados y grupos perjudicados por el diseño tecnológico y por las consecuencias de su aplicación. Los biocombustibles son presentados como una alternativa tecnológica limpia y novedosa para obtener energía renovable de manera no contaminante. La lógica del argumento en favor de una bioeconomía sustentable constituye un estándar racional universal. Nicole Karafyllis (2003) señala que en el discurso público, el término renovable tiene una connotación fuertemente positiva ya que se asocia con los ciclos de funcionamiento de la naturaleza, antes que con la intervención humana. Estos criterios racionales cumplen un rol de legitimación del diseño tecnológico predominante y contribuyen a diluir los aspectos políticos relacionados. No obstante los grandes cuestionamientos y argumentos en contrario, actualmente este modelo tecnológico continúa siendo el predominante (Shmidt *et al.*, 2012; Debnath, 2019).

En suma, el diseño tecnológico de producción de biocombustibles convencionales se fundamenta en una diversidad de factores que lo revisitan de coherencia técnica y de una lógica o racionalidad neutral. No obstante, existen una serie de problemas que revelan en el diseño lo que Feenberg llama “sesgo formal” (Feenberg, 2002: 80-82). Como se analiza en el apartado siguiente, este sesgo produce efectos muy diferentes sobre los distintos actores implicados alrededor de la tecnología de los biocombustibles convencionales.

4.4.2. El sesgo en el diseño adoptado

Las dos controversias más importantes que han surgido en la producción de biocombustibles convencionales son: a) el uso alternativo de plantas cultivadas como fuente de alimentos (conflicto conocido como “alimentos versus combustibles”); y b) el uso alternativo del suelo o área cultivable. Ambas controversias han puesto de manifiesto un sesgo que demarca sectores beneficiados y sectores perjudicados por el diseño tecnológico adoptado.

4.4.2.1. Uso alternativo de las plantas cultivadas como alimento

El uso de plantas cultivadas como alimento para la producción de biocombustibles es la objeción más importante contra los biocombustibles de primera generación. Las plantas cultivadas son la fuente principal de alimentos para humanos y animales; en consecuencia, su uso alternativo para la producción de energía influye la cantidad total de alimentos producidos. Más allá de esto, el contraste de una serie de datos técnicos vuelve evidente ciertas debilidades intrínsecas del argumento en favor del diseño actual para la producción de biocombustibles. En Estados Unidos, el principal país impulsor de los biocombustibles convencionales y el primer productor mundial de bioetanol, el cultivo de maíz –materia prima para la fabricación del bioetanol–, es altamente intensivo y su producción requiere un gran gasto de energía en forma de maquinaria, fertilizantes, herbicidas, pesticidas y otros insumos. En promedio, se necesita 1 Btu de combustible fósil para producir 1,3 Btu de bioetanol a partir de maíz (Thompson, 2008a; Wenz, 2009: 308)⁷. En estas condiciones de producción no resulta muy sólido el argumento que sostiene que los cultivos de plantas constituyen una fuente renovable de energía, considerando que para su producción se requiere más de 75% de energía en forma no renovable. Los datos sugieren la existencia de una clara contradicción en un diseño tecnológico “que emplea una gran cantidad de energía para hacer un uso más racional de las reservas de energía”. De la misma manera, los datos sugieren también la existencia de una contradicción de orden ético en el diseño tecnológico que concibe la producción de alimentos y energía a partir de la misma materia prima. Un vehículo utilitario-deportivo con

⁷ Btu (*British thermal unit*) es una unidad de medida de energía.

una capacidad máxima de hasta 95 litros de combustible, necesita para llenar su tanque el equivalente de 200 kg de maíz en forma de bioetanol. Esa misma masa de granos contiene las calorías necesarias para alimentar a una persona durante un año (Gamborg *et al.*, 2011).

Aún desarrollando al máximo la producción de biocombustibles, el déficit energético no alcanzaría a ser cubierto o siquiera mitigado de manera efectiva, al menos en el corto o mediano plazo (Wenz, 2009; Gómiero, 2015). Frente al dilema del agotamiento de la energía convencional, aparece como razonable entonces, el argumento de que los biocombustibles convencionales conforman solo una parte de un paquete de soluciones posibles. A través de su posición hegemónica, los actores dominantes impusieron un discurso que presenta el sistema de producción adoptado como una respuesta a un interés global antes que particular. Sin embargo, los efectos ambientales y sociales causados por la producción de biocombustibles convencionales revelaron un diseño tecnológico sesgado, impuesto por la autonomía operativa de un grupo de actores dominantes en beneficio de sus intereses particulares (Feenberg, 2005).

4.4.2.2. *Uso alternativo del suelo*

Otra controversia, estrechamente relacionada con el debate “alimentos versus combustibles”, está motivada por el espacio finito disponible para la agricultura en el planeta. El desvío de granos hacia la producción de bioenergía tuvo como consecuencia la incorporación de nuevas áreas para cultivos, bien para compensar la disminución en la superficie de producción de alimentos o directamente para la producción de biocombustibles. El uso de nuevas áreas de cultivo para la producción de alimentos ha sido denominado “uso indirecto del suelo”. De la misma manera el “uso directo del suelo” se refiere a la incorporación de nuevas áreas destinadas al cultivo de materia prima para biocombustibles (Shortall, 2019).

Con el auge de los biocombustibles, la continua expansión de la frontera agrícola implicó la deforestación de vastas zonas naturales. Esta práctica conduce a un extraordinario aumento en la emisión de dióxido de carbono hacia la atmósfera, proveniente de la combustión de la materia orgánica almacenada en la biomasa y en el suelo de las regiones naturales (Fargione *et al.*, 2008). Es importante tener en cuenta que tanto el uso de combustibles fósiles como el de biocombustibles contribuye al efecto invernadero, a través de la generación de CO₂ y otros gases libe-

rados a la atmósfera. Como se ha señalado, cuando se utiliza como fuente de energía a los biocombustibles, se asume que esta emisión se ve parcialmente compensada por la captura de CO₂ atmosférico en la superficie terrestre a través del proceso de fotosíntesis. Aunque la emisión neta no sea estrictamente nula, potencialmente los biocombustibles generan menos CO₂ que los combustibles fósiles. No obstante esto, el beneficio ambiental específico es cuestionado por varios autores que señalan como un factor decisivo al diseño que se adopte para la producción de biocombustibles (Mudge, 2008; Carolan, 2009a). La deforestación de ciertos ambientes naturales y su conversión en áreas para la producción de biocombustibles genera una emisión excepcional de CO₂ que crea un fuerte desbalance entre el carbono liberado hacia la atmósfera y el carbono capturado en la superficie terrestre mediante fotosíntesis. Este desbalance puede demorar entre 17 y 423 años en ser equilibrado nuevamente, de acuerdo a las características ecológicas de la región deforestada (Fargione *et al.*, 2008)⁸. Esta ha sido una característica particularmente notable, por ejemplo, en regiones selváticas del sudeste asiático deforestadas para la producción de biodiésel a partir del aceite de palma (Shortall, 2019). En resumen, la deforestación llevada a cabo con el objetivo de incorporar nuevas áreas para la producción de bioenergía puede desencadenar en sí misma emisiones excepcionales de CO₂ durante largos períodos, aún mucho mayores que las causadas por el uso de combustibles fósiles como fuente de energía.

La persistencia del diseño de producción de biocombustibles convencionales, aún después del freno producido al final de la década 2000-2010, confronta con las graves consecuencias ambientales y sociales que acarrearán y con los estudios científicos que la desaconsejan. Al igual que el empleo de plantas utilizadas como alimento, el uso alternativo del suelo vuelve evidente que, a pesar de su discurso justificado en un presunto beneficio global, el diseño tecnológico para la producción de biocombustibles dista de ser neutral.

⁸ Por ejemplo, en selvas tropicales del sudeste asiático deforestadas para la producción de biodiésel, la recuperación del equilibrio de carbono podría insumir aproximadamente entre 300 y 400 años. En regiones del Cerrado en el centro y sureste de Brasil, deforestadas para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, se estima que el equilibrio se restablece entre 17 y 37 años. En cambio, la producción de biocombustibles en terrenos marginales y praderas que no se utilizan para la agricultura, requiere 1 año o menos para alcanzar un balance neutro de flujo de carbono (Fargione *et al.*, 2008).

4.4.3. La resistencia al código técnico predominante

Durante el año 2008, un aumento generalizado en el precio de alimentos básicos puso en peligro la seguridad alimentaria de importantes sectores de la población y generó revueltas populares en varios países. Si bien existen discrepancias respecto al mecanismo mediante el cual un aumento en la producción de biocombustibles contribuye a un aumento en el precio de alimentos, sí existe un consenso generalizado acerca de la correlación positiva entre ambas variables (Nuffield Council on Bioethics, 2011). En cualquier caso, los sucesos de 2008 fueron un componente crucial en el cuestionamiento generalizado hacia el diseño de producción de biocombustibles convencionales. Se volvió evidente que no se trataba de un problema de eficiencia técnica y económica sino de un problema político y social relacionado con el acceso a la alimentación (Thompson, 2008a; Thompson, 2012b). El sesgo en el diseño tecnológico fue puesto en evidencia a través de la resistencia de los sectores perjudicados. Esto se tradujo luego en una clara desaceleración del crecimiento de la producción (Schmidt, 2012; Palandri *et al.*, 2019).

La incorporación de nuevas tierras para cultivo, impulsada por el rápido crecimiento de los biocombustibles durante la década del 2000, produjo graves consecuencias ambientales y sociales. Aumentó el desplazamiento de comunidades campesinas ancestralmente afincadas en zonas que, en principio, fueron consideradas marginales para la producción agrícola intensiva. Esto motivó no solo la pérdida del hábitat ancestral de vivienda y subsistencia, sino también de los valores culturales propios de estas comunidades. La deforestación también provocó una seria amenaza ecológica por la pérdida de biodiversidad en la flora y la fauna de las zonas afectadas (Gomiero, Paoletti, Pimentel, 2010; Gamberg *et al.*, 2012).

El diseño de producción de biocombustibles a través de la agricultura segmenta grupos con intereses claramente contrapuestos. Por una parte, un grupo representado por grandes corporaciones propietarias de grandes superficies de producción. Estos grupos fueron asistidos en muchos casos por estados nacionales con un sistema agrícola bien consolidado, interesados en generar excedentes para la exportación o bien en la promoción de la producción de biocombustibles como instrumento para el logro de un mayor desarrollo rural. Para este sector los biocombustibles representaron una gran oportunidad para el desarrollo de un

modelo industrial de agricultura intensiva, con ganancias garantizadas en el corto plazo (Thompson, 2008a; Palandri *et al.*, 2019; Debnath, 2019). Con la cobertura de un discurso repetido como mantra, acerca del beneficio global y la adopción de medidas concretas para salvar el planeta, se promovió como valor excluyente la eficiencia del proceso de producción sin cuestionar el diseño tecnológico ni los efectos derivados de su aplicación. Se trata de una racionalidad sesgada, arraigada en un *ethos* productivista y basada en un concepto unívoco de la eficiencia que solo repara en el aspecto económico del proceso técnico. En esta concepción son considerados prescindentes otro tipo de conocimientos que, además de cuestiones de orden técnico, incluyen también factores ecológicos y sociales (Shortall, 2019). Estos grupos dominantes tampoco demuestran, al menos de manera explícita, disposición para rediscutir la configuración del diseño con otros actores o grupos de interés. Es una postura que se fundamenta en el concepto que Feenberg llama autonomía operativa y que el autor define como la capacidad de sectores con suficiente poder para imponer un diseño tecnológico de manera autónoma e inconulta (Feenberg, 2005).

En la vereda opuesta a este poder hegemónico se encuentran otros grupos, representados por sectores populares y por campesinos con unidades de producción más pequeñas, las cuales revisten gran importancia en las economías locales y regionales. Estos sectores sostienen intereses contrapuestos con los de los grandes propietarios. Más allá de los graves perjuicios que el actual modelo de producción les ha ocasionado, para estos grupos los biocombustibles también representan una oportunidad para discutir un modelo de agricultura diferente, que habilite una salida a las desigualdades y a los problemas ambientales globales ocasionados por el modelo de producción intensivo predominante (Shortall, 2019).

En suma, los biocombustibles tienen un significado muy diferente para cada uno de estos grupos. Feenberg sostiene que la tecnología es un sistema multiestable; el significado y la función de una determinada tecnología no es completamente flexible pero tampoco está determinado de antemano ni es definitivo. Más bien está abierto a diferentes interpretaciones y contingencias que dependen en buena medida del lugar que ocupen los distintos actores en relación al diseño y a la aplicación de esa tecnología. En palabras del propio autor:

La tecnología es un fenómeno con dos caras: en una parte está el ope-

rador, en la otra el objeto. Cuando tanto operador y objeto son seres humanos, la acción técnica es un ejercicio de poder. Más aún, donde la sociedad está organizada alrededor de la tecnología, el poder de la tecnología es la forma principal de poder en la sociedad (Feenberg, 2002: 16).

Y a continuación agrega “Ya que el lugar del control técnico influye el desarrollo tecnológico, nuevas formas de control democrático podrían establecer un desarrollo distinto a la trayectoria original” (Feenberg, 2002: 16).

La posibilidad de modificar la trayectoria de un proceso tecnológico a través de la resistencia de los grupos desfavorecidos es lo que confiere flexibilidad al diseño. A pesar de ser aún hoy el modelo predominante, la resistencia a los biocombustibles de primera generación contribuyó de manera fundamental a un cambio significativo en la concepción de lo que es una fuente de energía renovable y en la sustentabilidad indispensable de un proceso de fabricación de biocombustibles. Las configuraciones alternativas a los biocombustibles convencionales se hicieron evidentes y surgieron con fuerza a partir del reclamo de una diversidad de actores inicialmente subordinados. El caso de los biocombustibles refleja el rol de las intervenciones democráticas que resisten la imposición de una racionalidad sesgada que solo representa los intereses de los sectores dominantes (Feenberg, 2017b). El cuestionamiento y la resistencia de los sectores perjudicados, dirigidos hacia estos intereses particulares que se reflejan en el diseño tecnológico, ha llevado a poner en consideración las configuraciones alternativas para la producción de biocombustibles (Aro, 2016).

4.4.4. Configuraciones alternativas para la producción de biocombustibles

Durante unos 20 años, desde finales de la década del 80 y hasta el final de la primera década de este siglo, una conjunción de actores que incluía estados nacionales, grandes corporaciones involucradas en la producción de energía y grandes establecimientos de producción agropecuaria impusieron un diseño para la producción de biocombustibles a partir de cultivos tradicionales utilizados como fuente para la producción alimentaria. En principio, se identifican dos cuestiones principales que condujeron al cuestionamiento de ese diseño. Primero, como se indicó más

arriba, la resistencia activa de los actores directamente perjudicados (Gomiero, 2010). En segundo lugar, las reservas y advertencias provenientes del ámbito académico y científico respecto a la viabilidad de los combustibles convencionales como reemplazo de los combustibles fósiles en el sector transporte (Mudge, 2008; Thompson, 2008b; Gomiero, 2010; Gomiero, 2015). Ambas cuestiones redireccionaron la atención hacia los diseños tecnológicos alternativos para la producción de bioenergía a partir de plantas.

4.4.4.1. Biocombustibles de segunda generación

Una de las primeras alternativas a los biocombustibles convencionales fueron los llamados biocombustibles lignocelulósicos o de segunda generación. En principio, estos biocombustibles presentan tres ventajas notables respecto a los de primera generación. Primero, son producidos a partir de plantas que no son utilizadas como alimento de personas o animales. Segundo, si bien estas plantas tienen una serie de requerimientos nutricionales básicos, no requieren de terrenos con los niveles de fertilidad que demandan los cultivos utilizados para la producción de alimentos. Tercero, la totalidad de la planta, y no solo una parte de ella como es en el caso de los biocombustibles convencionales, puede ser aprovechada como materia prima para la obtención de bioenergía. Tilman *et al.* (2009), han propuesto incentivar mediante políticas públicas cinco vías de producción de biocombustibles: a) el cultivo de plantas perennes como *Panicum* y *Miscanthus* para la producción de bioetanol o de *Jatropha* para la producción de biodiésel. Estas especies no se cultivan para producir alimentos y pueden crecer en suelos degradados y de escasa fertilidad que no son aptos para los cultivos destinados a la producción de alimentos; b) el uso de los residuos remanentes posteriores a la cosecha de cultivos extensivos, como el maíz, el trigo y el arroz; c) el aprovechamiento de los residuos de la explotación forestal; d) el uso de residuos municipales e industriales; e) la práctica de una alternancia espacial y/o estacional entre los cultivos destinados a la producción de alimentos y aquellos destinados a la producción de energía.

En principio, las ventajas mencionadas revelan a la producción de biocombustibles de segunda generación como un diseño más avanzado y superador respecto a los de primera generación. Sin embargo, este diseño alternativo presenta también una serie de objeciones importantes

a considerar. En primer lugar, en los biocombustibles convencionales la fuente principal de los azúcares para producir bioetanol son el almidón y la sacarosa, extraídos del grano de maíz o trigo y de la caña de azúcar, respectivamente. En el caso de los biocombustibles de segunda generación, las dos fuentes principales de azúcares son la celulosa y la lignina, los dos compuestos naturales más abundantes en la naturaleza y componentes principales de la pared de las células vegetales. Ya que se trata de polisacáridos complejos que se encuentran naturalmente mezclados con otras sustancias, la extracción y el procesamiento de celulosa y lignina es más compleja que la de el almidón y la sacarosa (Bosworth, 2015). Este aspecto encarece considerablemente el proceso industrial para la obtención del bioetanol, ya que es necesario un procesamiento térmico, químico y bioquímico para liberar los azúcares de otros componentes antes de proceder a la fermentación para la obtención de bioetanol (Peralta-Yahya *et al.*, 2012). En segundo lugar, aún las plantas perennes especialmente cultivadas para la producción de bioenergía, crecen mejor y producen una mayor cantidad de biomasa a medida que aumenta la fertilidad del suelo. De manera que este aspecto no despeja en forma definitiva la eventual competencia por los mejores suelos entre las plantas cultivadas para alimentación y aquellas cultivadas para la obtención de energía. En tercer lugar, las tierras consideradas como marginales para la agricultura albergan comunidades humanas y una flora y fauna cuyo desplazamiento acarrearía situaciones similares a las causadas por la producción de biocombustibles convencionales. Finalmente, los residuos o el desperdicio de la cosecha no son necesariamente descartados; por el contrario, suelen ser utilizados para fabricar compost y otros fertilizantes naturales, o bien son dejados en el mismo terreno, para así proteger el suelo de la erosión y preservar su fertilidad (Gomiero *et al.*, 2010; Gamborg *et al.*, 2012). Esto significa que en principio, este material de desecho ya cuenta con una función o utilidad previamente asignada.

La producción de biocombustibles de segunda generación es un buen ejemplo de la ambivalencia de la tecnología y de cómo el diseño no es necesariamente un campo cerrado que excluye a todos aquellos que no son expertos. La nueva configuración introduce mejoras como consecuencia de un reclamo generalizado que incluye agencias de Naciones Unidas, comunidades campesinas, grupos ambientalistas y comunidades académicas, entre otros. Desde el punto de vista de la teoría crítica de la tecnología, esta demanda de los sectores afectados por un

determinado diseño tecnológico es un mecanismo democrático capaz de limitar la autonomía operativa de los sectores dominantes y modificar los códigos técnicos que estos imponen (Feenberg, 2005). Pero, si bien esta configuración alternativa al uso de plantas cultivadas como alimento tornaría más sustentable la producción de biocombustibles, no necesariamente introduce cambios en otros aspectos cuestionables del modelo de producción. Mientras la agricultura esté basada en un modelo productivo que sostenga como variable excluyente la eficiencia y esta sea a su vez entendida unívocamente, como la extracción del máximo beneficio de los recursos disponibles, los problemas propios de los biocombustibles convencionales pueden volver a repetirse con los biocombustibles de segunda generación (Pols y Spahn, 2019).

Existen además otras limitantes potenciales de carácter técnico, económico y sociológico para la implementación generalizada de los biocombustibles de segunda generación. Carolan (2010) analiza el escenario sociotécnico en el cual se produce la transición tecnológica de los combustibles convencionales hacia los biocombustibles. Aplicando un enfoque constructivista, el autor sostiene que el cambio de un diseño de producción de combustibles a otro no se apoya en una única causa. En todo caso se trata de un fenómeno multicausal, influenciado por el marco que determinan en conjunto la infraestructura, las regulaciones y los elementos simbólicos que rodean el uso de determinados combustibles en el sistema de transporte. El balance de todos estos factores operando en conjunto puede promover o frenar un cambio tecnológico en el campo de la energía. Aún cuando esté técnica y socialmente justificada, la transición hacia los combustibles de segunda generación puede verse frenada por esta serie compleja de factores. Por ejemplo, en el caso de Estados Unidos, principal productor mundial de bioetanol, existe toda una red de producción, almacenamiento y transporte diseñada específicamente para la obtención de bioetanol a partir del grano de maíz que en principio obra como condicionante para la adopción de otro tipo de diseño de producción (Carolan, 2009b; Carolan 2010). La teoría crítica también sostiene que los cambios tecnológicos siempre tienden a adaptarse a condiciones previamente existentes. Feng y Feenberg (2008) argumentan que

... los diseñadores no trabajan en un vacío. La mayoría de las veces la demanda, implícita o explícitamente, es que el nuevo diseño sea acorde con las formas ya establecidas. En otras palabras, los diseñadores mismos deben acomodarse al mundo social vigente, lo cual im-

plica someterse a las relaciones de poder y jerarquía existentes. La presión de esta coerción pasiva es un obstáculo significativo para la concreción de diseños alternativos (p. 117).

Pero además, Feenberg agrega al enfoque constructivista un componente específico de carácter político. En esa dirección, si entre los actores sociales implicados en la configuración del diseño no se incluye a los grupos que hasta el momento han estado subordinados, existe el riesgo de que los biocombustibles de segunda generación representen solo una modificación parcial o estrictamente técnica del diseño predominante y se repitan conflictos similares a los producidos por la irrupción de los biocombustibles convencionales (Gomiero *et al.*, 2010; Gamborg *et al.*, 2012; Feenberg, 2017a). Si bien aportan solución en una escala pequeña, el diseño de producción a partir de residuos en el nivel municipal o en pequeñas comunidades, podría ser en principio un ámbito propicio para la participación y la decisión popular en el ámbito del diseño de un sistema de producción de energía (Tilman *et al.*, 2009; Schmidt *et al.*, 2012).

4.4.4.2. Biocombustibles de tercera generación

Usualmente se llaman biocombustibles de tercera generación aquellos que utilizan como biomasa a las algas (Nuffield Council on Bioethics, 2011; Aro 2016). Las algas son organismos fotosintéticos marinos capaces de producir biocombustibles a partir del CO₂ fijado por fotosíntesis. Bajo determinadas condiciones de crecimiento, el biodiésel, y también el bioetanol y el biogas, son acumulados en las células de estos organismos que constituyen una alternativa muy importante a considerar como materia prima o biomasa para la obtención de biocombustibles (Gouveia, 2011; Bajpai, 2019)⁹.

Una ventaja importante de las algas es que son producidas en agua salada y por ese motivo no compiten con la agricultura en el uso del suelo. Sin embargo, existen aún varios factores que hacen de las algas una alternativa todavía poco explorada desde el punto de vista técnico y económico. Una de ellas es que la producción de biodiésel ocurre bajo

⁹ El biogas es un biocombustible gaseoso a base de metano (CH₄) producido por la combustión anaeróbica de biomasa. Se utiliza para la generación en escala pequeña de calor y electricidad y como combustible para el transporte (Schmidt *et al.*, 2012).

condiciones de crecimiento alejadas de las condiciones óptimas para las algas, lo que motiva un menor crecimiento y baja producción de biomasa (Aro, 2016). Otro problema pendiente de solución es la recolección y la desalinización del medio de cultivo (Peralta-Yahya, 2012). El análisis de las algas como potencial fuente de biocombustibles excede a los objetivos de este trabajo. Un detalle de los recientes avances en este campo puede ser consultado en Gouveia (2011) y Bajpai (2019), junto con la bibliografía citada en estos textos.

4.4.4.3. *Biología sintética y biocombustibles de cuarta generación*

Como se ha mencionado en el Capítulo I, desde su emergencia a principios del siglo XXI, la biología sintética acarrea sobre sí con una carga considerable de expectativas en cuanto a lo que de ella puede esperarse. Sus mentores la han presentado como la posibilidad de aplicar los conceptos medulares y las prácticas propias de la ingeniería sobre los organismos biológicos. Esto ha creado la idea de un campo de una potencialidad enorme y absolutamente original: a través del rediseño de la naturaleza se podrían ofrecer las respuestas necesarias a los problemas más acuciantes que enfrenta la humanidad (Porcar y Peretó, 2014). La biología sintética implicaría entonces, siempre de acuerdo con los principales mentores del área, el comienzo de una nueva era en el control y la explotación de los recursos naturales. No se trata solamente de la capacidad de comprender los mecanismos últimos de la vida, desde el propio nivel molecular, para luego explotarla como recurso. El conocimiento en este dominio cuenta ahora con una capacidad súper expandida para rediseñar y modificar la vida y, más aún, con la potencial capacidad experimental de “crear vida” de manera sintética (Gibson *et al.*, 2010). En este punto crucial la biología sintética se distingue de la biología molecular y la tecnología del ADN recombinante por su capacidad de intervención en los sistemas biológicos, no solamente para transformarlos, sino también, y aquí está la gran novedad, para diseñarlos y construirlos (Morange, 2009a).

En relación al problema de la energía, desde el mismo momento en que comenzó a delinearse como nueva disciplina tecnológica, los promotores de la biología sintética coincidieron en establecer el desarrollo de los biocombustibles como uno de sus objetivos fundamentales. La reprogramación de las formas de vida existentes, o aún la creación

de organismos con capacidades enteramente nuevas, se proyecta como una alternativa excepcional para satisfacer en forma simultánea las necesidades más urgentes en el campo de la energía: reemplazar a los combustibles fósiles por una fuente de combustibles renovable, producir energía de manera menos costosa y disminuir el impacto ambiental (Schmidt *et al.*, 2012; Porcar y Peretó, 2014). En este marco puede interpretarse la febril actividad y entusiasmo reflejado en los múltiples estudios y proyectos de diseño de organismos para la producción de fuentes de energía alternativas. A partir de la década iniciada en 2010, un importante número de iniciativas gubernamentales y compañías biotecnológicas orientaron sus investigaciones hacia el diseño de nuevas fuentes de provisión de bioenergía. Mackenzie afirma que los biocombustibles son la cara industrial más importante de la biología sintética (Mackenzie, 2013; Mackenzie, 2014). Destaca esta singularidad por el carácter eminentemente práctico de la disciplina y por su impulso para desarrollar proyectos tecnológicos: “Mientras aceptamos que toda la ciencia es hoy en mayor o menor grado tecnociencia (conocer y hacer; descubrimiento e innovación), la biología sintética exhibe un marcado énfasis en hacer cosas” (Mackenzie, 2013: 191).

Con una inmensa base de datos biológicos y con técnicas ultra sofisticadas para la manipulación al nivel molecular de los componentes celulares, la biología sintética se despliega como una opción novedosa y con alta potencialidad para resolver la dependencia de una fuente de carbono básica. Los organismos productores de energía podrían reemplazar a las fuentes no renovables y también a los biocombustibles de primera y segunda generación, planteados originalmente como renovables pero revelados como costosos y con efectos negativos imposibles de desestimar, tanto sobre el ambiente como sobre las poblaciones campesinas y urbanas próximas a los lugares de explotación. Esto podría concretarse cuando los rendimientos de los biocombustibles de tercera o cuarta generación sean compatibles con una escala industrial y cuando el costo de obtención de la materia prima sea menor al de los combustibles fósiles. La biología sintética se encuentra aún en un estadio temprano de desarrollo como disciplina y mientras no ingrese en una fase de producción industrial más o menos masiva no es posible determinar con certeza los posibles conflictos derivados de los efectos de su aplicación (Deplazes, Ganguli-Mitra y Biller-Andorno, 2009).

Ahora bien, el código técnico está inscripto en la etapa de diseño

de una determinada tecnología, anterior a su aplicación. En todo caso un código técnico se define a partir de decisiones políticas previas que responden a ciertos intereses y que se traducen en el diseño. En la biología sintética identificamos en principio dos aspectos que conformarían un código técnico. Uno de ellos, relacionado con los objetivos y los métodos propios de la disciplina, es la pretensión de diseño racional de organismos fundada en la aplicación de los principios de la ingeniería. Estos procedimientos permitirían un control acabado de la materia viviente, con un grado de sofisticación mucho mayor al alcanzado con las técnicas precedentes de la biotecnología. Esta pretensión levanta una legítima sospecha de un intento de apropiación de la naturaleza ignorando una serie de riesgos potenciales que trae aparejada la manipulación de organismos. Lo que se da por asumido en este código técnico es que el enfoque racional de la biología sintética es la garantía de un control total de la materia viviente. Sin embargo, las propiedades autopoiéticas de los organismos, su capacidad de autoorganización y autoreproducción y la deriva evolutiva natural suponen un límite a esa pretensión de control total. En consecuencia será necesario aplicar el principio precautorio sobre los diseños de la biología sintética antes de proceder a su aplicación. El principio precautorio establece un freno a las actividades tecnológicas que puedan acarrear un daño moralmente inaceptable a seres humanos y al medio ambiente. Conceptualmente, el principio precautorio podría interpretarse como la posibilidad de examinar el código técnico de un diseño tecnológico con anterioridad a su aplicación. Aún cuando sea incierta, en caso de que la producción de un daño sea posible desde el punto de vista científico, se adoptarán medidas preventivas para evitar o disminuir ese daño. En esencia, el establecimiento del principio precautorio marca un giro desde una postura de control de una tecnología a posteriori de los daños ocasionados (responsabilidad civil como instrumento curativo) hacia una postura de control preventivo, anterior a la aplicación y a los posibles daños que un desarrollo tecnológico eventualmente pudiera ocasionar (COMEST, 2005).

El Nuffield Council Report (2011) propone un marco ético general para la evaluación de los proyectos de nuevos biocombustibles basado en seis principios básicos que pueden sentar las bases generales para una discusión del código técnico de los biocombustibles fabricados mediante biología sintética:

- i. El desarrollo de biocombustibles no debería afectar derechos hu-

manos esenciales, tales como el acceso a las fuentes de alimento y al agua, a la salud, al trabajo y a la posesión de la tierra.

ii. La producción de biocombustibles debe preservar el medioambiente en forma sustentable.

iii. Los biocombustibles deben contribuir a una reducción neta de la emisión de los gases del efecto invernadero y no exacerbar el cambio climático global.

iv. El intercambio comercial de los biocombustibles debe desarrollarse en acuerdo a los principios básicos de justicia y reconociendo los derechos a una recompensa justa por el trabajo (incluyendo derechos de trabajo y de propiedad intelectual).

v. Los costos y los beneficios derivados de los biocombustibles deben ser distribuidos equitativamente.

vi. Si los cinco principios anteriores son respetados y si los biocombustibles son capaces de mitigar los efectos negativos del cambio climático, luego, el desarrollo de biocombustibles es una tarea necesaria. Además, existen una serie de consideraciones adicionales a tener en cuenta respecto al costo, la evaluación comparativa con fuentes de energía alternativa, el grado de incertidumbre en el desarrollo, la irreversibilidad de los posibles efectos, el nivel de participación en la toma de decisiones, entre otras (Nuffield Council Report, 2011: XXV).

El otro aspecto relacionado con el código técnico de la biología sintética reviste un carácter más general y es común a varias de las tecnologías emergentes. El nivel de novedad excepcional que se atribuye al diseño ingenieril de organismos no parece que alcance en la misma medida a los aspectos sociotécnicos de las prácticas de diseño. Por ejemplo, la discusión en torno al diseño y la propiedad de los organismos biológicos parece seguir reservada mayormente al criterio técnico de los expertos. Lo mismo ocurre con el debate sobre la distribución y el uso final que se haga de la energía obtenida (Oye y Wellhausen, 2009; Stemerding *et al.*, 2009). Los biocombustibles de primera y segunda generación también fueron presentados en su momento como una solución racional al problema de la energía. Pero esa racionalidad no incluía en la discusión del diseño a una parte importante de lo que Feenberg llama actores subordinados (Feenberg, 2005; Feenberg, 2017a). El nivel de sofisticación y control de los métodos de la biología sintética no son razones *a priori* para pensar que los desarrollos en curso en materia de energía estén exentos de repetir ese camino.

4.5. La teoría de la instrumentalización en la tecnología de los biocombustibles

4.5.1. Instrumentalización primaria

Como se menciona en el Capítulo III, la instrumentalización primaria hace referencia a las relaciones elementales del sujeto técnico con los objetos de su entorno. Se trata de una observación o revelación del mundo en términos funcionales mediada, de acuerdo al sustantivismo, por una suerte de aidez del sujeto que percibe los objetos de una manera utilitaria, como simples recursos técnicos (Heidegger, 1997). De acuerdo a Feng y Feenberg (2008):

La disposición técnica de un sujeto y la forma en la cual se conciben los objetos constituye la instrumentalización primaria. La instrumentalización primaria ocurre mediante una descontextualización y una simplificación de los objetos para resaltar aquellas cualidades que les asignan una función (p. 113).

Pero aún en este nivel, donde se definen y seleccionan como recursos útiles los elementos básicos de artefactos y procesos tecnológicos, Feng y Feenberg (2008) remarcan que existe una referencia concreta de las realizaciones técnicas en el mundo:

... un análisis detallado [de los elementos técnicos] revelaría en cada caso alguna clase mínima de contingencia social que controla la selección e implementación, aún en su forma más sencilla. Los elementos técnicos emergen en el contexto de tradiciones técnicas complejas, resultado de un pasado social y cultural que modela la acción técnica y puede hacer contener en ella un mínimo contenido social (p. 113).

En la instrumentalización primaria de la tecnología de producción de biocombustibles se distingue, por un lado, a los biocombustibles de primera y segunda generación, cuya producción está basada en plantas cultivadas y se lleva a cabo por medio de técnicas industriales más o menos convencionales que ya han sido puestas en práctica, algunas de ellas desde hace varias décadas atrás. Por otro lado, los biocombustibles de tercera y cuarta generación están basados en innovaciones técnicas recientes que implican la modificación profunda en el nivel molecular.

Este segundo grupo se encuentra en una escala de investigación en el laboratorio y comprende proyectos de adaptación de algas, microorganismos y plantas para la producción de biocombustibles.

En la producción de biocombustibles de primera y segunda generación, el suelo y las plantas se constituyen como los elementos técnicos básicos o *affordances* (Feenberg, 2002: 77-79). Sobre estos elementos opera un grado de descontextualización y sistematización inicial que implica una transformación de objetos naturales en objetos técnicos. La descontextualización se complementa además con un desplazamiento de la función social del suelo y las plantas como fuente de alimentos. La sistematización complementa la descontextualización; ambos actos operan de manera conjunta: algunos objetos son seleccionados como recursos por sus cualidades primarias para la producción de biocombustibles (las plantas o partes de plantas que constituyen la biomasa). Otros objetos son descartados por reunir cualidades consideradas secundarias o no relevantes como recursos. Así, Feenberg distingue cualidades primarias y secundarias en los objetos considerados recursos, para diferenciar los atributos que juegan un rol esencial en un determinado proyecto técnico de aquellos otros que no resultan importantes a los fines de tal proyecto. Los objetos técnicos son luego simplificados al ser reducidos a sus cualidades primarias específicas, es decir a sus componentes moleculares útiles, hidratos de carbono o aceites, que constituyen el sustrato para la producción del biocombustible (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002).

Feenberg señala dos características generales más, propias de la instrumentalización primaria, que operan con importantes consecuencias prácticas en el proceso de producción de biocombustibles. Una de ellas es la autonomización, que implica la separación de la acción del sujeto respecto de las consecuencias de dicha acción. Las consecuencias de las acciones de desplazar la función de las plantas como fuente de alimentos, o de deforestar un ambiente para incorporar nuevas tierras de cultivo, no son padecidas por el sujeto técnico que concibe y ejecuta u ordena ejecutar, dichas acciones. El sujeto técnico habita un espacio distante del lugar donde se desencadena la acción técnica; esto le permite dilatar los efectos de su propia acción y evitar que se vuelvan sobre sí mismo de manera inmediata. Feenberg considera a esto la esencia de la autonomía operativa: el sujeto de la práctica técnica cuenta con el poder suficiente para dilatar las consecuencias de su acción inicial en un per-

juicio propio. En la teoría crítica de la tecnología, la autonomía operativa es uno de los elementos básicos que definen a una acción como un tipo de acción técnica (Feenberg, 2005). Este concepto contribuye a explicar por qué la producción de biocombustibles de primera generación fue activamente alentada en la mayoría de los países durante varias décadas, sin atender a las consecuencias de sus acciones. Como se ha apuntado, a pesar del punto de inflexión en la producción que significaron las protestas masivas en el año 2008, este diseño de producción de biocombustibles perdura hoy prácticamente como la única opción industrial para la obtención de bioenergía (Debnath, 2019; Ethanol Producer Magazine, 2020).

También es un rasgo propio de la instrumentalización primaria la posición que ocupa un sujeto con iniciativa para realizar una acción técnica cuyas consecuencias recaen sobre otros sujetos o sobre la naturaleza. En el caso de los biocombustibles, la acción técnica implica un posicionamiento ventajoso para aprovechar en beneficio propio recursos elementales, tales como el sol, el agua, el aire y el suelo integrados en los procesos físicos y químicos de captura de energía solar por parte de las plantas. La posición del sujeto de la acción técnica es estratégica y jerárquica desde el punto de vista económico y social. Por ejemplo, muchas empresas que movilizaron capitales para la producción de biocombustibles, tanto convencionales como de avanzada, participaban previamente en el mercado de producción de energía convencional a partir de recursos fósiles (Carolan, 2010; MacKenzie, 2013). Eso les confiere un capital de conocimiento y experiencia previa que facilita el acceso a las plantas cultivadas y a los ambientes naturales como recursos para sus objetivos de extracción de energía.

En el caso de los biocombustibles de avanzada, el nivel de instrumentalización primaria exhibe otro grado de complejidad. En principio, los recursos que se procuran pueden ser los mismos que en el caso de los biocombustibles de primera y segunda generación. Se recurre a las plantas como biomasa y más específicamente a sus componentes químicos, hidratos de carbono y aceites, como sustrato para la producción de biocombustibles (Peralta-Yahya *et al.*, 2012; Shih, 2018). Pero además, la biología sintética agrega como nuevo recurso la información y la capacidad de manipulación genómica de cualquier organismo viviente. Esto comprende potencialmente a todas las secuencias de genes y de sus múltiples elementos regulatorios de las cuales se pueda extraer cualquier función útil para la fabricación de biocombustibles (Mackenzie, 2013; Way *et al.*, 2014).

En la biología sintética, en el nivel de instrumentalización primaria se reducen y simplifican los organismos a determinadas funciones codificadas físicamente en los genes. Estos recursos o funciones específicas son aislados y descontextualizados del genoma original para formar parte de otros organismos o ser incorporados en las bibliotecas de partes biológicas o *biobricks*. En este proceso de descontextualización y reducción, el genoma de cualquier especie es virtualmente una parte más de una colección global, el genoma de la biosfera (Rubin, 2008). Nikolas Rose y Adrian Mackenzie han designado a este proceso como un “aplanamiento” de la sustancia biológica, a través del cual una función específica de un organismo, codificada en su secuencia de ADN, es abstraída del propio organismo o especie. Rose sostiene que:

En este mundo aplanado [de la biología sintética], proliferan las intervenciones en las cuales casi cualquier elemento vital puede, en principio, ser liberado de su vínculo con una célula, órgano, organismo o especie, para circular en forma libre y ser combinado, bajo ciertas condiciones, con cualquier otro (Rose, 2006: 16, citado por Mackenzie, 2010).

Mackenzie llama a estas prácticas metatécnicas aplicadas para la creación de metamateriales; procedimientos de abstracción característicos de la biología sintética que en su afán de diseño basado en principios ingenieriles, procura aislar el material molecular de las incertezas propias de los procesos biológicos (Mackenzie, 2010)¹⁰. La característica novedosa de la biología sintética radica en la posibilidad de separar en escala masiva los recursos genómicos de su ambiente biológico natural. La información de estos recursos es almacenada en bibliotecas, como reserva biológica para el eventual diseño ingenieril de nuevos organismos.

En la biología sintética, el nivel de instrumentalización primaria se desarrolla puertas adentro de los laboratorios. En principio, en este ámbito los *biobricks* pueden ser reensamblados en múltiples combinaciones

¹⁰ Mackenzie usa aquí el prefijo meta para significar el acto de abstracción de un objeto respecto de su entorno natural para la creación de un nuevo objeto. De esta manera ensaya una caracterización de la biología sintética como disciplina que trabaja con metatécnicas y crea metamateriales. La biología sintética construye metamateriales mediante combinaciones heterólogas u ortogonales al abstraer secuencias de ADN de su entorno biológico natural e incorporarlas en otro entorno biológico. Del mismo modo, las metatécnicas se conforman a través de la reunión de técnicas, conocimientos y protocolos propios de la biología molecular en un nuevo arreglo para el trabajo de ingeniería a escala genómica, propio de la biología sintética.

sin mayores limitaciones. Aquí se nota el carácter revolucionario o de extrema novedad de la biología sintética. Ahora bien, al igual que apunta Feenberg en su teoría de la instrumentalización, Mackenzie y Calvert observan que la biología sintética es tecnología dedicada a la descontextualización de lo viviente. Pero estas operaciones ocurren necesariamente con arreglo a un mundo preexistente en el cual todas las cosas tienden a ser convertidas en bienes y servicios tecnológicos comercializables (Mackenzie, 2013). El espacio de diseño depende entonces de la innovación tecnológica pero también del marco histórico preexistente o de las restricciones impuestas por una herencia técnica (Feng y Feenberg, 2008). Así el universo de las combinaciones de *biobricks* se ven en última instancia limitados por su necesidad práctica de adaptación al mundo existente. Los niveles de abstracción propios de la instrumentalización primaria necesariamente deben ser contextualizados en un siguiente nivel de instrumentalización secundaria, con el objetivo de alinear de manera congruente la tecnología y la sociedad. Bajo esta perspectiva, la biología sintética y los biocombustibles en particular, conforman un escalón más de la biotecnología, impulsada por imperativos de orden estrictamente práctico en el cual se busca transformar los procesos biológicos en sistemas tecnológicos.

4.5.2. Instrumentalización secundaria: marco sociotécnico de la producción de biocombustibles

El nivel primario de instrumentalización no define de manera acabada un artefacto tecnológico. A eso se refiere Feenberg cuando afirma que la tecnología está subdeterminada si se pretende definirla únicamente en base a la estricta racionalidad de los elementos técnicos (Feenberg, 2008; Feng y Feenberg, 2008). Para transformarse en un objeto técnico, los recursos o elementos básicos seleccionados en la instrumentalización primaria deben ser combinados o rearreglados en un diseño ajustado a un ambiente natural, social y técnico específico. Este proceso de realización abre el camino a la manifestación y la confrontación de intereses y valores sociales en tecnología. Es lo que Feenberg define como nivel de instrumentalización secundaria de un objeto tecnológico, concepto que desde una perspectiva constructivista, se aproxima al análisis sociotécnico propio de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología (Feenberg, 1999; Carolan, 2010; Feenberg, 2017b).

La reconstrucción histórica del surgimiento del bioetanol como una alternativa a la nafta permitirá entender mejor el ascenso meteórico y posterior caída de los biocombustibles ocurrido en las últimas tres décadas, así como también, la crítica a partir de la cual emerge la biología sintética como alternativa para diseñar y producir un biocombustible renovable, que mejore o supere los problemas expuestos de los biocombustibles de primera y segunda generación. Desde la perspectiva constructivista que Feenberg emplea para el análisis de la instrumentalización secundaria (Feng y Feenberg, 2008), se trata de una disputa histórica entablada para definir el tipo de combustible a utilizar en el sistema de transporte. El análisis constituye un ejemplo apropiado de cómo las circunstancias históricas, sociales, políticas, técnicas y culturales, es decir, el marco socio-técnico, definen un artefacto tecnológico y condicionan su posterior trayectoria y evolución (Thompson, 2008a). En nuestra discusión tomaremos como referencia la trayectoria del etanol como biocombustible en Estados Unidos, país considerado la cuna de la industria del transporte automotor y primer productor mundial de bioetanol en la actualidad (Carolan, 2009b; Carolan, 2009c; Carolan 2010). El ejemplo que analizamos da cuenta de manera elocuente del carácter contingente e indeterminado de la tecnología y de cómo la política es incorporada en la trayectoria tecnológica de los artefactos (Winner, 1999; Feenberg, 2002).

Históricamente, la causa del predominio de los grupos que favorecían a la nafta como combustible, por sobre aquellos que buscaban imponer al etanol, no se redujo a un único factor de carácter técnico, como suele argumentarse desde la perspectiva instrumentalista de la tecnología. Cuando se inicia la era del transporte automotor a comienzos del siglo XX, una diversidad de factores de orden económico, político, científico, infraestructural y simbólico, mutuamente relacionados unos con otros, confluyeron para crear las condiciones de manera que el etanol *aparezca o sea visto* como una alternativa menos conveniente que la nafta. Generalmente, la historia que se relata en el presente tiende a reducir las disputas entre diseños tecnológicos alternativos a una cuestión de eficiencia y costo económico. Pero ninguno de estos dos parámetros pueden ser objetivados y considerados de manera absoluta, como si fueran de validez universal. Los criterios de eficiencia y costo económico solo pueden ser definidos en relación a un contexto determinado y no de manera independiente, como categorías abstractas (Feenberg, 1999;

Feenberg, 2002; Alexander, 2008). “La eficiencia no es un estándar absoluto que puede ser calculado de manera abstracta sino solo en relación a las demandas contingentes específicas que se inclinan en favor de un diseño” (Feenberg, 2017b: 59). De acuerdo al “principio de simetría”, cualquiera de las dos opciones, etanol o nafta, podría haber sido elegida¹¹. Tal como sostiene Feenberg (1999), el hecho de que finalmente prevaleciera la nafta se debe a que:

la elección entre alternativas no depende, en última instancia, ni de lo técnico ni de la eficiencia económica sino de la “sintonía” entre el artefacto y los intereses y creencias de los diferentes grupos sociales que influyen al proceso de diseño. Lo que distingue a un artefacto no es alguna propiedad intrínseca, sino su relación con el entorno social (p. 79).

Previo al surgimiento de la industria automotriz, el combustible doméstico más utilizado en Estados Unidos era el bioetanol obtenido a partir de la fermentación de granos de cereales. Su combustión era bastante limpia, se trataba de un recurso que formaba parte de la vida cotidiana y era posible obtenerlo a muy bajo costo. Sin embargo, el bioetanol acarrea sobre sí con una enorme carga simbólica negativa relacionada con el consumo de bebidas alcohólicas, principalmente originada en principios de orden religioso. En 1862, en plena Guerra Civil, se legisló un aumento de diez veces en el impuesto al consumo de alcohol. La *sin tax* (impuesto al pecado) era un impuesto al consumo reñido

¹¹ El principio de simetría de la corriente constructivista sostiene que en el análisis retrospectivo de una controversia científica no resulta consistente atribuir un plus de racionalidad a la argumentación que se ha consagrado vencedora. Más bien, cada argumentación debe ser examinada en forma imparcial, independientemente de su veracidad o falsedad y en relación al contexto social en que se origina. De otra manera, el análisis será inevitablemente parcial por el sesgo que implica el conocimiento previo de la resolución final de la controversia. Aplicado al diseño tecnológico, el principio de simetría analiza los distintos intereses en torno a cada alternativa de diseño, al tiempo que desestima la idea de que la configuración finalmente adoptada para un artefacto se impuso sobre las competidoras por su presunta mayor eficiencia. El concepto del principio de simetría fue elaborado por David Bloor en base al principio de indeterminación de Duhem-Quine que sostiene que no es posible asumir como válida una hipótesis científica sin que sea necesario considerar antecedentes o hipótesis auxiliares que son ajenas a la hipótesis bajo examen (Feenberg, 1999: 78). Esto podría ser equivalente, expresado en términos del lenguaje popular “a analizar el partido del domingo con el diario del lunes”, es decir con el prisma que impone el conocimiento previo del resultado final.

con la moral religiosa y peligroso para la salud. El impuesto no discriminaba entre los diferentes usos del alcohol como bebida o como combustible, ni tampoco los diferentes volúmenes entre un uso doméstico e industrial. Prontamente, el uso de bioetanol como combustible encontró un sucedáneo en el kerosene, también obtenido de manera relativamente sencilla y abundante en la naciente industria del petróleo (Carolan, 2009b).

A principios del siglo XX, la nafta se convirtió en el derivado liviano más abundante del petróleo crudo. En esa misma época el impuesto al alcohol industrial fue finalmente derogado; su precio efectivamente cayó, pero no hasta el punto de ser más barato que la nafta (McCarthy, 2001). De manera que una creencia de origen religioso-cultural se convirtió en el factor decisivo para el establecimiento de un impuesto que mantuvo en un valor muy alto el precio del alcohol durante casi cuatro décadas. En ese lapso, la industria automotriz estaba en pleno crecimiento y así la *Standard Oil*, una empresa de producción de combustibles derivados del petróleo, dispuso de un tiempo suficiente para crear un mercado sin una competencia fuerte y para consolidar a la nafta como alternativa de combustible para el transporte. Dos décadas más tarde, otro marco legal de prohibición general de consumo de alcohol conocido como la ley seca, vigente en Estados Unidos desde 1920 a 1933, asestaría un nuevo golpe a las posibilidades del bioetanol de convertirse en el combustible para el transporte (Carolan, 2009b).

No es difícil discernir que ninguno de estos factores, propios del contexto social que imperaba cuando emergió la industria automotriz, estaba relacionado con las propiedades técnicas intrínsecas de la nafta o del bioetanol como combustibles. En todo caso, ambos materiales eran igual de “buenos o malos” para servir como combustible. Sin embargo, como bien apunta Carolan, “nada es en sí mismo un combustible. Combustible es simplemente un término para [designar a] un portador de energía. De esta forma, para ser considerado como “combustible”, un portador de energía particular requiere que un sistema socio-técnico brinde el marco apropiado” (Carolan, 2009b: 422). Este marco es lo que define entonces que material puede ser el más apropiado para ser elevado a la categoría de combustible. En otras palabras, un combustible definido solo en términos técnicos no es un objeto tecnológico porque con esa única definición el objeto permanece subdeterminado. Las características técnicas no predeterminan su cualidad de combustible. Solo

el contexto social o marco socio-técnico va a terminar de definir al objeto como un objeto tecnológico. De esta forma, se crea un marco para establecer un código técnico para el combustible para el transporte. La afirmación de Carolan acerca de cómo diversos factores sociales llegan a establecer lo que es un combustible es similar a lo discutido previamente en objetos como la bicicleta, la caldera de los barcos de vapor o la línea de montaje para la producción industrial en el capitalismo moderno (Feenberg, 1999; Feenberg, 2002).

Por supuesto que las características técnicas existen y que contribuyen a definir las aptitudes de los materiales. Pero dichas características no son nunca independientes de la definición formal del problema que se busca solucionar, del contexto en que se hagan los ensayos técnicos y de las variables y parámetros que se tengan en cuenta para evaluar qué material resultará el más apropiado para el cumplimiento de una determinada función. Además de Estados Unidos, muchos otros países consideraban al bioetanol como una alternativa real de combustible para el transporte, aún en mayor grado que la nafta. En las primeras décadas del siglo XX, un número importante de instituciones sociales, académicas, profesionales y también usuarios, realizaron diversos ensayos en condiciones que confirmaban que varias características del bioetanol como combustible (potencia, combustión, nivel de contaminación ambiental, nivel de ruido, entre otras), eran tan buenas o mejores que las de la nafta (Carolan, 2009b). En paralelo, los grupos impulsores de la nafta realizaron pruebas muy similares, pero arribando a resultados opuestos. Estos grupos utilizaron motores de baja compresión y condiciones de altas temperatura en sus ensayos, las cuales favorecían el tipo de nafta de bajo octanaje que era posible de obtener en ese momento. Este tipo de prácticas sugieren fuertemente que la nafta *ya había sido elegida como combustible para el transporte*, aún antes de cualquier ensayo destinado a evaluar sus características técnicas. El diseño de motores de baja compresión se convirtió así en el modelo predominante, adaptándose bien a las características de la nafta y no a las del etanol. De la misma forma, los depósitos de combustible estaban mayormente adaptados al almacenamiento de nafta. Estos depósitos frecuentemente contenían restos de agua, lo cual resultaba inocuo para la nafta pura pero no para las mezclas de alcohol con nafta. En presencia de agua una solución alcohólica tiende a separarse en dos fases, disminuyendo así la calidad de la combustión (Carolan, 2009b; Carolan, 2009c).

Un aspecto crucial en las disputas tecnológicas entre las diferentes alternativas de un diseño es la lógica con que se asume el planteo del problema. El análisis constructivista desestima por reduccionista la idea de que el progreso tecnológico se desarrolla teleológicamente, mediante un camino prefijado por criterios universales que se erige como una progresión lineal de eficiencia económica y productividad creciente. Más bien, el avance tecnológico “se va construyendo” como resultante de las fuerzas de cada uno de los actores por hacer prevalecer sus intereses particulares en torno a un determinado diseño en disputa (Feng y Feenberg, 2008; Feenberg, 2017a). Así, con el objetivo de generar el mayor consenso posible, los discursos en pugna que buscan favorecer un diseño u otro se vertebran en torno a supuestas necesidades de la sociedad en su conjunto (Feenberg, 1999). Los propulsores del bioetanol muy tempranamente basaron sus argumentos en el carácter finito y no renovable del petróleo y de la dependencia de los países productores para su obtención. Además de ser cierto, ese argumento también respondía a la necesidad de resolver un problema económico propio de un momento histórico particular: el extraordinario excedente de granos generado por el advenimiento y las mejoras de la mecanización rural en las primeras décadas del siglo XX y por la finalización de la demanda sostenida durante la Primera Guerra Mundial. Los propulsores de la nafta, por su parte, insistieron en la necesidad de preservar la salud y erradicar los vicios morales de la sociedad, despejando cualquier posibilidad de incentivo a la producción de alcohol que podría ser aprovechado para consumo humano. Enfatizaron la necesidad de un combustible barato, potente y confiable, argumentando razones económicas, como el aprovechamiento de la infraestructura instalada, y también razones políticas, como la expansión del crecimiento industrial para el logro de la supremacía económica mundial (Carolan, 2009b).

La disputa entre la nafta y el bioetanol quedó finalmente clausurada entre 1920 y 1930 con el argumento de la mayor eficiencia de la primera de las dos alternativas. Dos factores, adicionales a los mencionados más arriba, contribuyeron en forma importante a clausurar la disputa en favor de la nafta como el combustible para transporte. Por un lado, el descubrimiento del efecto del plomo como aditivo de la nafta permitió el diseño de motores de alta compresión que mejoraron considerablemente la eficacia de la combustión. Por otra parte, el descubrimiento de la enorme reserva de petróleo en el este de Texas contribuyó a despe-

jar los temores de una posible paralización de la industria por desabastecimiento de combustible (Carolan, 2009c). Como se desprende a partir del análisis de las circunstancias económicas, políticas y sociales que rodeaban esta disputa, la conclusión es que esa elección no se apoyaba en las supuestas propiedades técnicas superiores de la nafta. Ambas alternativas reunían atributos positivos y negativos a la hora de definir el mejor combustible para el sistema de transporte. Más bien, las corporaciones propulsoras de la nafta —de manera emblemática la *Standard Oil*—, convertidas en actores dominantes y consolidadas como monopolios durante una época de plena expansión de la industria petrolífera, aprovecharon las circunstancias económicas, sociales y culturales apuntadas para reforzar su posición de poder y cerrar la disputa en su favor. Quedó establecido así un *código técnico* en torno al diseño tecnológico de producción de combustibles para el transporte. Las características que debería reunir una sustancia para ser considerada apta como combustible de transporte fueron definidas o se acomodaron a las propiedades que se habían demostrado para la nafta: buena combustión, potencia a altas temperaturas y en motores de baja compresión y buena miscibilidad con el agua, entre otras. Más tarde, el agregado de plomo en la nafta cambiará ligeramente el código, aliviando el requisito de un motor de baja compresión. Y más aún, la demanda de organizaciones comprometidas con las mejoras y la democratización del cuidado de la salud y el ambiente, motivó la búsqueda y el hallazgo posterior de aditivos mucho menos tóxicos que el plomo. Lo mismo puede decirse de las modificaciones posteriores en el diseño del motor que redujeron aún más la polución. Todas estas modificaciones en el código técnico muestran en definitiva el carácter flexible y ambivalente de la tecnología y evidencian su naturaleza social antes que estrictamente técnica (Feenberg, 1999).

¿Cómo fue posible, que tras haber transcurrido unas cinco décadas de la clausura de esta disputa, la alternativa de los biocombustibles para uso en el sistema de transporte resurgiera con la fuerza con que reapareció a finales del siglo XX? Precisamente, el hecho mismo de que el bioetanol haya sido en el pasado una alternativa real a la nafta es uno de los motivos que ha permitido su resurgimiento. De hecho el bioetanol es un artefacto que, aún no siendo el combustible predominante en la actualidad, desde hace varias décadas ya formaba parte del sistema de combustibles para el transporte (Carolan, 2010). Varias características de la disputa entre el bioetanol y la nafta a principios del siglo XX han

permanecido vigentes hasta el presente. Los principales argumentos políticos en favor del uso de bioetanol continúan siendo plenamente válidos; por ejemplo, el carácter de reserva finita de los combustibles fósiles y la importancia estratégica para cualquier país de la conquista de la independencia energética¹². A esto se agrega la preocupación y el compromiso, en el nivel gubernamental, en organizaciones no gubernamentales y en la ciudadanía en general de enfrentar el problema de la contaminación ambiental, el efecto invernadero y el cambio climático a través de normas y regulaciones específicas. Otro factor crucial fue el impulso y sostén de un mercado global a través de una serie de medidas económicas implementadas en el nivel estatal (Palandri *et al.*, 2019). En cuanto a los aspectos técnicos y la infraestructura material, es pertinente considerar que en la disputa original entre la nafta y el bioetanol, las alternativas se planteaban como nafta pura versus distintos grados de mezcla de etanol en un combustible a base de nafta (Carolan, 2009b). Esto significa que la infraestructura para el almacenamiento, el transporte y el expendio de bioetanol es bastante similar a la que ya estaba instalada desde hace décadas para el empleo de la nafta. Igualmente, el diseño y el mantenimiento mecánico del motor no son muy diferentes para ambas alternativas; los biocombustibles trabajan en motores de combustión interna, tal cual lo hace la nafta.

Finalmente, un motivo crucial de orden socioeconómico se apoya en el hecho de que, a diferencia de lo ocurrido a comienzos del siglo XX, la industria de los combustibles ya no ve a los propulsores de los biocombustibles como rivales abiertos de una disputa tecnológica. La razón es que la industria del petróleo se encuentra comenzando una clara fase de declinación en la extracción del crudo (*post-peak oil*). Una fracción importante de los combustibles fósiles quedará agotada en los próximos 50 años (Callegari *et al.*, 2020). Consecuentemente, se debe recurrir a una alternativa para poder sostener la industria del automóvil y del transporte en general. A este respecto, la industria de los derivados del petróleo y la industria automotriz aparecen interesadas en una transición en la forma de combustibles como el E10 y E85 para autos que funcionan con mezclas de alcohol y nafta. De manera que el (re)surgimiento de los biocombus-

¹² El argumento de la independencia energética de Estados Unidos resurgió con fuerza particular luego de los ataques de septiembre de 2001 y tenía una fuerte presencia en el discurso público. Este fue un motivo que contribuyó fuertemente al abrupto incremento de la producción de bioetanol en los primeros años de la década del 2000 (Carolan, 2010).

tibles también responde a una necesidad de los poderes establecidos en torno a la industria de los combustibles y del automóvil. Los biocombustibles convencionales representan la mejor oportunidad para que un cambio en la trayectoria tecnológica de los combustibles, motivado en buena medida por el agotamiento de las reservas de petróleo, no desplace a estos grupos de su posición de poder. Por eso, en el plano discursivo existe una preferencia por los términos biocombustibles o biocombustibles renovables antes que biocombustibles alternativos o de avanzada, los cuales reemplazarían completamente a la nafta y también eventualmente al bioetanol (Carolan, 2010). Dicho de otra manera: los combustibles alternativos o los nuevos biocombustibles de cuarta generación fabricados mediante biología sintética en principio no resultarían aceptables para la industria petrolera y automotriz. La instrumentalización secundaria de estos potenciales biocombustibles se verá entonces fuertemente condicionada por la vasta red material y cultural existente en la actual industria del transporte (Carolan, 2010; Mackenzie, 2013).

En conclusión, al igual que en el proceso de consolidación de la nafta como combustible principal para el transporte, la irrupción del bioetanol en las últimas décadas como una alternativa a la nafta pura tampoco fue motivada por una única causa determinante. No hubo causas excluyentes que determinaron una irrupción súbita, producto de la innovación tecnológica, del poder de presión del sistema agroindustrial o de una repentina preocupación gubernamental, a nivel global, para salvar el planeta del desastre ambiental. Más bien, el análisis sociotécnico revela que las condiciones para la aparición del bioetanol en los años 90 estaban en buena medida ya creadas previamente; esto es el bioetanol se “reincorporó” al interior de un sistema sociotécnico específico de transporte que ya contaba con un marco o trayectoria tecnológica previamente definido. Una vez que un determinado marco tecnológico se ha consolidado en un sistema sociotécnico, no es posible introducir cualquier tipo de innovación. El marco establece una guía que opera como restricción para el cambio tecnológico, o bien una suerte de dependencia de lo ya establecido. El bioetanol volvió a prosperar como alternativa por haber formado parte del sistema sociotécnico de transporte forjado durante más de un siglo. Aún cuando se sostenga que la biología sintética representa una expresión revolucionaria dentro de la biotecnología, sus diseños y producciones tecnológicas necesariamente deberán ser adaptados al marco sociotécnico vigente.

Consideraciones finales

La investigación llevada a cabo en este trabajo ha sido guiada por tres propósitos fundamentales. Por una parte hemos analizado a la biología sintética y a la clase de artefactos que esta nueva disciplina biotecnológica se propone producir. Por otra parte hemos hecho una reconstrucción de las ideas fundamentales de la teoría crítica de la tecnología formulada por Andrew Feenberg, concentrando nuestro análisis en la noción de diseño y código técnico. En la parte final de nuestro trabajo hemos reunido estos conceptos para aplicarlos a un estudio de caso particular, el proceso tecnológico de producción de biocombustibles y los proyectos que la biología sintética propone concretar en este campo.

Hemos discutido los rasgos fundamentales que definen a la biología sintética como una expresión tecnológica altamente novedosa, de acuerdo a lo sostenido por sus principales propulsores, que fusiona los desarrollos de la biología molecular más avanzada con las formas de trabajo propias de la ingeniería. Hemos expuesto las producciones más representativas y algunos logros de fuerte impacto de la biología sintética, aunque la gran mayoría de sus proyectos se encuentran hoy en una fase de desarrollo tecnológico en ejecución. A continuación hemos ensayado una caracterización ontológica de los productos de la biología sintética en tanto su doble condición de objetos tecnológicos y organismos vivientes reunidos en un único ente. Para ello hemos recurrido a una “joven tradición” de análisis filosófico de los artefactos tecnológicos, el “Programa de la naturaleza dual de los artefactos” que define a estos como objetos híbridos, constituidos por un componente material y un componente intencional relacionado con los propósitos del agente humano (Kroes y Meijers, 2006). Ya en el interior de este campo, abordamos el dominio particular de los bioartefectos, en los cuales, como rasgo

característico, las funciones biológicas y tecnológicas se presentan de manera superpuesta.

Andrew Feenberg sostiene en su teoría crítica de la tecnología que los objetos tecnológicos no son neutrales; por el contrario, llevan inscrito en su diseño los valores sociales de una época, lo cual confiere a estos objetos una carga política. ¿Podríamos hablar entonces de un tercer componente como parte de la naturaleza que describe a los artefactos, representado por esta carga política del diseño que Feenberg llama código técnico? En principio consideramos válido ensayar una conciliación entre el Programa Dual y la Teoría Crítica en lo que se refiere a la naturaleza de los artefactos. Sostenemos que la inclusión de un componente de orden político en los objetos tecnológicos es *ontológicamente* relevante porque permite una descripción más acabada de la esencia de los mismos. Podemos fundamentar esta idea interpretando las palabras del propio Feenberg cuando explica la influencia de lo social en el “contenido” de un artefacto “... el contexto no es solo un factor externo a la tecnología sino que realmente penetra en su misma racionalidad, trasladando los requerimientos sociales a las mismas funciones del artefacto” (Feenberg, 2017b: 46). Más aún, siguiendo la perspectiva analítica trazada por Feenberg, negar la existencia de este componente implicaría una forma de aceptación del carácter instrumental de la tecnología, ya que consideraría a los objetos tecnológicos como entidades puramente neutrales. También podría sostenerse que, si bien la carga política sí forma parte efectiva de los objetos tecnológicos, esto no justificaría su inclusión como un atributo ontológico especial, necesario para describir la esencia de dichos objetos. Para esta línea de argumentación el contenido político ya se encontraría incluido en el elemento intencional que compone a los artefactos. Sin embargo, un razonamiento en esa dirección asumiría al proceso de diseño como una operación enteramente racional y aislada de toda incidencia proveniente del contexto social en el que se desarrolla dicho proceso. Precisamente el argumento de Feenberg es que hay un conjunto de valores naturalizados que se incorporan en el diseño mediante un proceso que no es reflexivo (Feenberg, 2017b). Se trata, para utilizar un lenguaje propio de la dialéctica de Lukács y la Teoría Crítica, de aquellos valores reificados que, como tales, no responden a elecciones plenamente conscientes ni mucho menos intencionales. En todo caso, los artefactos exhiben una combinación de elecciones enteramente intencionales y otras que no lo son y que responden a valores de época. Estas últimas con frecuencia aparecen más encrip-

tadas o no evidentes y se revelan a través del examen sociotécnico de los artefactos y los procesos tecnológicos (Feng y Feenberg, 2008).

En resumen, la combinación del análisis ontológico y sociológico nos permite proponer un tercer componente, necesario para completar una descripción más precisa de los artefactos tecnológicos. Si bien en este trabajo nos hemos enfocado en los objetos que produce la biología sintética y en el diseño de producción de biocombustibles, nuestra propuesta tiene un carácter más amplio y podría ser extendida a los objetos tecnológicos en general. Proponemos entonces una posible definición de objeto tecnológico como una entidad material sobre la cual se ha aplicado una determinada intención y que conlleva en su estructura y en su funcionamiento una carga de valores que reflejan el orden social vigente. Los ejemplos analizados por Feenberg que hemos detallado en el apartado 3.5.1. del Capítulo III acerca del tamaño de las máquinas al comienzo de la Revolución Industrial y de la línea de montaje fordiana en el capitalismo de comienzos del siglo XX son elocuentes para ilustrar este concepto. Más contemporáneamente, la transgénesis en las plantas soja analizada en el apartado 3.6. del Capítulo III, también representa un ejemplo de la carga política o los valores incorporados en un objeto biotecnológico.

Consideramos particularmente valioso integrar en este trabajo un análisis sociotécnico de los biocombustibles como estudio de caso, empleando las herramientas conceptuales que proporciona la teoría crítica de la tecnología de Feenberg. Justificamos esta decisión por al menos dos cuestiones importantes. La primera de ellas es que los biocombustibles se han presentado a la sociedad como un recurso fundamental para la solución de un problema global absolutamente candente, como es la escasez de energía motivada por el agotamiento de los recursos fósiles. La segunda cuestión importante que motiva nuestra orientación hacia los biocombustibles es que la biología sintética se ha enfocado fuertemente en la modificación de organismos para la obtención de nuevas fuentes de energía renovable. La síntesis de biocombustibles se ha convertido en uno de los objetivos fundamentales a concretar por la biología sintética.

Al abordar la trayectoria tecnológica de los biocombustibles, nuestro análisis se ha concentrado en dos conceptos fundamentales de la teoría crítica: el diseño tecnológico y el código técnico. Si los valores imperantes en una época histórica y los intereses que se corresponden con

esos valores quedan impresos en el diseño de los objetos tecnológicos, luego la tecnología se erige como un vehículo eficaz para la realización de estos intereses. El campo del diseño es el escenario donde se manifiesta la disputa entre diferentes actores por imponer la configuración que mejor responda a sus propias necesidades. Los grupos o sectores sociales dominantes con suficiente poder –Feenberg llama a este poder autonomía operativa–, direccionan el diseño hacia una configuración que garantiza el mantenimiento de esa posición de privilegio (Feenberg, 2002; Feenberg, 2005; Kirkpatrick, 2017). Pero el diseño no revela de manera explícita los intereses de los grupos dominantes sino que los mismos quedan objetivados en un conjunto de conceptos y normas que justifican esa configuración como la única posible o como la más eficiente desde el punto de vista técnico. A esta operación de objetivación materializada en el diseño Feenberg la llama código técnico.

La trayectoria tecnológica de los biocombustibles en el marco de la teoría crítica

Durante la mayor parte del siglo pasado la producción de biocombustibles se limitó a emprendimientos individuales, desarrollados de manera aislada y azarosa. En las últimas tres décadas del siglo la producción comienza a consolidarse y finalmente se impone con éxito un diseño tecnológico que conduce a un sistema de producción global de biocombustibles. Este diseño, con plena vigencia en la actualidad, se funda en un uso alternativo de plantas que son direccionadas hacia la producción de energía, en lugar de orientarse –como ha sido práctica habitual desde tiempos ancestrales– a la producción de alimento para personas y animales. Proponemos la existencia de un código técnico, que justificó este diseño al momento de su emergencia, a través de una serie de argumentos que lo presentaron como prioritario y urgente de llevar a la práctica. Estos argumentos incluían una defensa del diseño en el orden técnico, económico, político y ambiental, junto con la promesa de que su adopción implicaría beneficios generales para el conjunto de la sociedad. En primer lugar, se sostuvo la necesidad de disponer de una fuente de energía renovable que reemplazara el empleo de combustibles de origen fósil. En segundo lugar, la producción de biocombustibles fue ponderada como una forma de reducir la emisión de dióxido de carbono y otros gases contaminantes, principales respon-

sables del calentamiento global y el cambio climático. Finalmente, se argumentaba como ventajosa la posibilidad para una buena parte de los países del planeta de alcanzar la soberanía energética, en la medida en que esta dependería de una actividad tan básica y universal como la agricultura y no de la localización geográfica azarosa de un yacimiento específico con reservas fósiles. Los tres argumentos guardan en sí mismo una universalidad irrefutable y presuponen en conjunto un beneficio global que alcanzaría al conjunto de la humanidad. Asimismo, la denominación de energía verde o energía limpia en referencia a los biocombustibles, contribuyó a alinear aspectos científicos, económicos, políticos y culturales para establecer fuertes consensos a favor de su producción a partir de plantas, tanto en los países más industrializados como en aquellos productores de materias primas o en vías de desarrollo.

Las grandes corporaciones del negocio del petróleo y los complejos agroindustriales obtuvieron fuertes beneficios con el diseño inicial de producción de biocombustibles de primera generación. En vez de concebir a los biocombustibles como un mercado que amenazaba a la industria convencional del petróleo, buscaron asegurarse un lugar dominante en el mercado a sabiendas del agotamiento irreversible de las reservas fósiles. Los estados nacionales también jugaron un papel decisivo en la consolidación de este diseño tecnológico al crear y proteger el mercado de los biocombustibles en el último tercio del siglo pasado, con lo cual garantizaba la producción y la demanda a futuro (Carolan, 2010). Apoyados en su autonomía operativa los actores dominantes utilizaron un discurso para definir el problema en términos de necesidades compartidas por toda la sociedad. Sin embargo, un examen más detallado de la modalidad de producción de biocombustibles de primera generación pone de manifiesto una serie de riesgos implicados en la adopción de ese diseño y revela que este respondía prioritariamente a intereses particulares. La necesidad creciente de energía, la urgencia por desarrollar un modo de producción en sintonía con los desafíos del cambio climático y el agotamiento de la reserva fósil actuaron sinérgicamente para impulsar un aumento continuo en la producción de biocombustibles. Inevitablemente esto iba a desembocar en una fuerte competencia entre la producción de energía por un lado y, por el otro, la producción de alimentos y la sustentabilidad ambiental y social.

A partir del año 2008, el ascenso de la producción de bioetanol y también de biodiésel experimentó un freno muy importante. Un cali-

ficado grupo de voces académicas, organizaciones internacionales como Naciones Unidas y numerosos grupos ambientalistas advirtieron acerca de las graves consecuencias que acarrearía el aumento indiscriminado de la producción de biocombustibles de primera generación. Se argumentaron dos factores cruciales que contribuyeron al *impasse* en la producción. Por una parte, al considerar el ciclo de vida completo del bioetanol y el biodiésel; esto es, desde el cultivo de plantas para la generación de biomasa, hasta su utilización como combustible de transporte, las emisiones totales de dióxido de carbono y de otros gases responsables del efecto invernadero no resultan ser significativamente menores que las generadas a partir de combustibles fósiles (Fargione *et al.*, 2008; Mudge, 2008; Tilman *et al.*, 2009). En contrapartida, el avance de la frontera agrícola y el desmonte acelerado de áreas naturales, motivados por la fiebre de un negocio con un rápido retorno de las inversiones y ganancia asegurada, ocasionaron una serie de daños muy significativos en poblaciones humanas y en la flora y la fauna que habitan en los lugares de producción. Entre los más notables se cuentan el desplazamiento de sus lugares de origen, la pérdida de valores culturales ancestrales y la pérdida de biodiversidad. Por otra parte, la crisis en el precio de los alimentos que estalla en 2008 marcó un verdadero punto de inflexión en la producción de biocombustibles de primera generación. Se generó una resistencia activa proveniente de una articulación amplia y diversa de actores perjudicados para forzar una redefinición en el diseño de producción: comunidades campesinas desplazadas y clases populares rurales y urbanas cuya alimentación depende de manera crítica de insumos básicos de la agricultura. La participación conjunta de organizaciones de base y voces académicas conforman un sustrato potente para el replanteo del diseño y el código técnico imperantes (Feenberg, 1999). Lo que en principio apareció como una mejora del diseño surgida de la racionalidad de los expertos, fue en realidad impulsado por el reclamo de los sectores perjudicados por ese diseño y los efectos de su aplicación masiva. La producción de biocombustibles a partir de plantas cultivadas introduce un sesgo que no contempla los intereses de los actores subordinados, los cuales no tienen participación formal en el proceso de diseño. Feenberg (2005) sostiene que:

la crítica de la tecnología se enfoca precisamente en las contradicciones del proceso de recontextualización ya que es aquí donde se introduce el sesgo en el diseño. Esto resulta particularmente claro en el capita-

lismo, donde las estrategias para el éxito en los negocios y la búsqueda de beneficios a menudo suponen la ruptura de la organización social. Así, la recontextualización tiende a ignorar los valores e intereses de quienes están involucrados en las redes técnicas del capitalismo, sea como trabajadores, usuarios o miembros de una comunidad que habita en el lugar de producción (p. 57).

En conclusión, la crisis de 2008 y el acuerdo de diferentes sectores de la comunidad para cambiar el diseño de producción vigente significó un cuestionamiento al código técnico dominante que justificaba la producción de biocombustibles de primera generación. El cambio del código técnico impulsado por el reclamo de los sectores más perjudicados revela el rol de las intervenciones democráticas en la resistencia al sesgo del diseño (Feenberg, 2005). También pone de manifiesto el carácter social y la reflexividad de la tecnología, reestructurada continuamente por las demandas sociales. Nuevamente Feenberg (2017b) lo resume en forma elocuente:

Los códigos técnicos tecnocráticos son puestos en cuestión en este tipo de disputas. Como algo “racional”, la tecnología se expresa como una aparente inevitabilidad. Está asumido que los mecanismos y sistemas hacen lo que hacen debido a lo que “son”. Esta es la peligrosa tautología de la ilusión de la tecnología. Para crear un espacio para la agencia, los ciudadanos involucrados en la técnica deben luchar para superar esta ilusión y restaurar la conciencia de la contingencia como parte del dominio técnico. La misma definición de lo que es el progreso está en juego en esta lucha (p. 655).

No obstante los daños ocasionados, las opciones alternativas de diseño a los biocombustibles convencionales aún no han logrado imponerse. Si bien estas tensiones pueden finalmente desembocar en su prohibición definitiva en varios países, en la actualidad la producción a partir de plantas cultivadas continúan siendo la principal forma de producción de energía alternativa a los combustibles fósiles. En el año 2008, el momento de máximo ascenso en la producción de biocombustibles a nivel global, Estados Unidos, primer productor mundial de bioetanol –y junto con Brasil principal impulsor de la industria de biocombustibles–, contaba con 175 plantas de producción a partir de granos de maíz, con una producción total aproximada de 35.000 millones de litros. Actualmente en Estados Unidos existen 203 plantas con una pro-

ducción aproximada de 53.000 millones de litros de bioetanol. El 98% de dicha producción continúa utilizando el grano de maíz como sustrato inicial del proceso de producción. Solo existen 4 plantas en las cuales la biomasa proviene de alguna forma de biocombustibles de segunda generación, principalmente residuos de cosecha o afluentes de desperdicios (Carolan, 2009b; Carolan, 2010; Ethanol Producer Magazine, 2020; Renewable Fuels Association, 2020).

Si bien la emergencia de la biología sintética supone un cambio profundo en el conocimiento y en la capacidad de intervención en el mundo viviente, el aspecto novedoso de esta nueva disciplina no reside tanto en el terreno epistémico sino más bien en las características de sus productos como objetos técnicos orientados hacia una función determinada. Ahora bien, desde una perspectiva tecnológica, considerando el alcance de sus prácticas de diseño y aplicación, las producciones de la biología sintética estarán siempre condicionadas por la matriz socio-técnica en la cual se insertarán. La elección de los biocombustibles utilizados para el transporte como un desarrollo estratégico de la biología sintética, sea en forma de plantas o microorganismos modificados, no puede dejar de responder a un esquema prestablecido de producción y utilización de energía. Desde la perspectiva de la teoría crítica, se trata de un nivel de instrumentalización secundaria condicionado o sesgado por el sistema de transporte previamente existente. Existe un contraste entre el carácter altamente novedoso que propone la biología sintética para la producción de energía renovable en la forma de biocombustibles de avanzada y la posterior aplicación de estos productos en un sistema sociotécnico de transporte caracterizado por un formato forjado desde los inicios del siglo XX. Para el caso del transporte terrestre, en principio la infraestructura instalada para la producción y el almacenamiento de combustible, el trazado de rutas y caminos, las características mecánicas generales de los automóviles y las prácticas y valores culturales de los usuarios van a obrar como condicionante del tipo de biocombustible a producir, independientemente de las diferentes forma de obtención que la biología sintética pueda diseñar. En otras palabras, el diseño de los organismos biológicos en sí y de los nuevos compuestos que estos pueden producir, puede ser “revolucionario” y se podría imaginar que a través de la biología sintética se puede diseñar un biocombustible ideal, de producción sencilla y barata, con alta densidad energética y baja emisión de CO₂. Sin embargo, la producción de configuraciones alternativas a

los biocombustibles convencionales estará fuertemente condicionada por el contexto material, social, cultural y económico previamente existente en el sistema de transporte.

Las restricciones que impone el nivel de instrumentalización secundario operan también de una manera positiva. El cambio de los biocombustibles de primera hacia los de segunda generación necesariamente resuena en los proyectos de biología sintética. Las estrategias en curso para la producción de biocombustibles de avanzada conciben el sustrato lignocelulósico como la biomasa apropiada para el crecimiento de los microorganismos modificados. Existen proyectos de grandes empresas de trabajar con sustratos diferentes a los de las plantas cultivadas e incluso aún, la posibilidad de diseñar microorganismos que prescindan de la materia prima, mediante la conversión directa de la energía solar a biocombustibles.

Pero no es el grado de sofisticación en el control de la materia viviente el factor a través del cual la biología sintética se va a revelar como disciplina capaz de comenzar a resolver los problemas de la escasez de energía y contaminación ambiental. Aún cuando su contribución puede ser muy significativa en esta área, sostener que los atributos intrínsecos de racionalidad de la biología sintética son suficientes para considerar a la nueva disciplina la solución a los problemas de provisión de energía responde a una concepción instrumentalista de la tecnología. Será necesario garantizar la participación popular en cuestiones esenciales relativas al diseño, la propiedad de los organismos y la distribución equitativa de los beneficios y los riesgos, aspectos centrales en una concepción de la biología sintética como un fenómeno técnico y social.

Quedan, lógicamente, muchas preguntas cuyo abordaje permitirá seguir expandiendo el conocimiento sobre las implicancias sociales de los objetos tecnológicos que la biología sintética propone construir. Aunque luego de la explosión inicial, a principios de la pasada década, el entusiasmo respecto a los nuevos biocombustibles parece haber ingresado en una meseta, las necesidades en torno al reemplazo de los combustibles de origen fósil por una fuente de energía verdaderamente sustentable continúan siendo tan vigentes como perentorias. Es evidente a partir de lo que hemos desarrollado en este trabajo que los biocombustibles de primera generación no satisfacen una condición mínima de viabilidad. Las producciones de la biología sintética para crear una fuente renovable de energía deberán superar la racionalidad tecnocrática

imperante en la tecnología contemporánea. En función de esto, la bioseguridad, la gobernabilidad, los derechos de propiedad intelectual y el rol de la sociedad civil y las organizaciones populares son temas claves que necesitan ser estudiados con mayor profundidad en lo general, a la vez que deben reexaminarse con cada producción concreta.

Hacia el interior de la teoría crítica, y refiriéndonos ahora a la tecnología en general, un tema que demandará considerable trabajo de investigación es la cuestión del sesgo en el diseño y sus correspondientes implicancias. Pero no nos referimos al sesgo imperante, es decir aquel derivado de la racionalidad basada en la eficiencia, sino al “contrasesgo” o sesgo de mayorías, basado en el acuerdo de distintos sectores para transformar la dirección del rumbo tecnológico actual en una tecnología con orientación democrática. ¿Cuáles serán los mecanismos que posibiliten la articulación de distintos sectores, cada uno con sus propias identidades y reivindicaciones y aún todos ellos atravesados por la misma racionalidad de la tecnología actual al servicio de intereses particulares? Siguiendo una idea de Don Ihde, Feenberg sostiene que la transformación de la tecnología debe proceder desde la tecnología misma, sin importar conceptos de fuentes externas como la política, la filosofía o la religión (Feenberg, 2017b: 115-116). Sin embargo, será necesario establecer un diálogo atento que contenga a la mayor cantidad posible de sectores, en las distintas sociedades, para encontrar las claves en el camino hacia la emancipación tecnológica.

Bibliografía

- Acheampong, Michael; Ertem, Funda Cansu; Kappler, Benjamin; Neubauer, Peter (2016). "In pursuit of Sustainable Development Goal (SDG) number 7: Will biofuels be reliable?". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75: 927-937.
- Alexander, Karns J. (2008). *The mantra of efficiency. From Waterwheel to Social Control*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- Aranda, Darío (2019, 20 de mayo). "Dos mil millones a indemnizar". *Página 12*. [En línea] <https://www.pagina12.com.ar/195005-dos-mil-millones-a-indemnizar> [Consulta: 5 de abril de 2020].
- Aro, Eva-Mari (2016). "From first generation biofuels to advanced solar biofuels". *Ambio* 45 (Suppl. 1), S24-S31.
- Atsumi, Shota; Cann, Anthony F.; Connor, Michael R.; Shen, Claire R.; Smith, Kevin M.; Brynildsen, Mark P.; Chou, Katherine J.Y.; Hanai, Taizo; Liao, James C. (2008). "Metabolic engineering of *Escherichia coli* for 1-butanol production". *Metabolic Engineering*, 10: 305-311.
- Azevedo-Rocha, Carlos G. (2016). "The Synthetic Nature of Biology". En Kristin Hagen, Margret Engelhard, Georg Toepfer (eds.), *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology* (pp. 9-53). Heidelberg-New York-Dordrecht-London: Springer.
- Bajpai, Pratima (2019). *Third generation biofuels*. Singapore: Springer.
- Baker, Lynne R. (2008). "The Shrinking difference between artifacts and natural objects". *American Philosophical Association Newsletter on Philosophy and Computers*, 7(2): 2-5.

- Birner, Regina (2018). "Bioeconomy concepts". En I. Lewandowski (ed.), *Bioeconomy Shaping the Transition to a Sustainable, Biobased Economy* (pp. 17-38). Cham: Springer.
- Boldt, Joachim (ed.) (2016). *Synthetic Biology, Metaphors, Worldviews, Ethics, and Law*. Wiesbaden: Springer.
- Bosworth, Sydney C. (2015). "Perennial grass biomass production and utilization". En Anju Dahiya (ed.), *Bioenergy. Biomass to Biofuels* (pp. 73-87). London-Oxford-Cambridge-San Diego: Academic Press, Elsevier.
- Broncano, Fernando (2000). *Mundos artificiales. Filosofía del cambio tecnológico*. México: Editorial Paidós Mexicana.
- Buraschi, Mónica (2014). *Biocombustibles argentinos: ¿oportunidad o amenaza? La exportación de biocombustibles y sus implicancias políticas, económicas y sociales. El caso argentino*. Córdoba: Edicea, Universidad Nacional de Córdoba.
- Callegari, Arianna; Bolognesi, Silvia; Ceconeto, Daniele; Capodaglio, Andrea G. (2020). "Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50, 4: 384-436.
- Cameron, D.; Ewen Bashor Caleb, J. y Collins, James J. (2014). "A brief history of synthetic biology". *Nature Reviews | Microbiology* 12: 381-390.
- Campos, Luis (2009). "That was the synthetic biology that was". En M. Schmidt, Alexander Kelle, Agomoni Ganguli-Mitra y Huib de Vriend (eds.), *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences* (pp. 5-21). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.
- Canton, Barry; Labno, Anna; Endy, Drew (2008). "Refinement and standardization of synthetic biological parts and devices". *Nature Biotechnology*, 26, 7: 787-793.
- Carolan, Michael S. (2009a). "The costs and benefits of biofuels: a review of recent peer-reviewed research and a sociological look ahead". *Environmental Practice*, 11: 17-24.
- Carolan, Michael S. (2009b). "Ethanol versus Gasoline: The contestation and closure of a socio-technical system in the USA". *Social Studies of Science*, 39: 421-448.

- Carolan, Michael S. (2009c). "A sociological look at biofuels: Ethanol in the early decades of the twentieth century and lessons for today". *Rural Sociology*, 74, 1: 86-112.
- Carolan, Michael S. (2010). "Ethanol's most recent breakthrough in the United States: A case of socio-technical transition". *Technology in Society*, 32, 2: 65-71.
- COMEST (2005). "Informe del Grupo de Expertos sobre el Principio Precautorio". Comisión Mundial de Ética del Conocimiento Científico y la Tecnología. [En línea] <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000139578> [Consulta: 8 de marzo de 2021].
- Copley, Shelley D. (2017). "Shining light on enzyme promiscuity". *Current Opinion in Structural Biology*, 47: 167-175.
- Cuevas Badallo, Ana (2016). "Los bioartefactos: viejas realidades que plantean nuevos problemas en la adscripción funcional". En Jorge Enrique Linares y Elena Arriaga (coords.), *Aproximaciones interdisciplinarias a la bioartefactualidad* (pp. 23-54). México: UNAM.
- Debnath, Deepayan (2019). "From biomass to biofuel economics". En Deepayan Debnath y Suresh Chandra Babu (eds.), *Biofuels, Bioenergy and Food Security. Technology, Institutions and Policies* (pp. 45-66). London-Oxford-Cambridge-San Diego: Academic Press, Elsevier.
- Decoene, Thomas; De Paepe, Brecht; Maertens, Jo; Coussement, Pieter; Peters, Gert; De Maeseneire, Sofie L. y De Mey, Marjan (2018). "Standardization in synthetic biology: an engineering discipline coming of age". *Critical Reviews in Biotechnology*, 38, 5: 647-656.
- Deichmann, Ute (2012). "Crystals, colloids, or molecules? Early controversies about the origin of life and synthetic life". *Perspectives in Biology and Medicine*, 55, 4: 521-542.
- Deplazes, Anna; Ganguli-Mitra, Agomoni y Biller-Andorno, Nikola (2009). "The ethics of synthetic biology: outlining the agenda". En Markus Schmidt, Alexander Kelle, Agomoni Ganguli-Mitra y Huib de Vriend (eds.), *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences* (pp. 65-79). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.
- Dosi, Giovanni (1982). "Technological paradigms and technological

- trajectories. a suggested interpretation of the determinants of technical change”. *Research Policy*, 11: 147-162.
- Echeverría, Javier (2003). *La revolución tecnocientífica*. Madrid: Fondo de Cultura Económica.
- Endy, Drew (2005). “Foundations for engineering biology”. *Nature*, 438, 24: 449-453.
- Ethanol Producer Magazine (2020). “US and Canada ethanol plants”. [En línea] <http://www.ethanolproducer.com/plants/listplants/US/Operational/All>. [Consulta: 4 de diciembre de 2020].
- European Commission (2005). “Synthetic Biology: Applying Engineering to Biology. Report of a NEST High-Level Expert Group”. [En línea] https://haseloff.plantsci.cam.ac.uk/resources/SynBio_reports/NEST_syntheticbiology_2005.pdf [Consulta: 1 de agosto de 2020].
- FAO (2019). “OECD-FAO, Agricultural Outlook 2019-2028”. [En línea] http://www.fao.org/3/CA4076EN/CA4076EN_Chapter9_Biofuels.pdf [Consulta: 8 de agosto de 2020].
- Fargione, Joseph; Hill, Jason; Tilman, David; Polasky, Stephen; Hawthorne, Peter (2008). “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt”. *Science*, 319: 1235-1238.
- Feenberg, Andrew (1999). *Questioning Technology*. London-New York: Routledge.
- Feenberg, Andrew (2002). *Transforming technology: a critical theory revisited*. New York: Oxford University Press.
- Feenberg, A. (2005). “Teoría crítica de la tecnología”. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 5, 2: 109-123.
- Feenberg, Andrew (2008). “From Critical Theory of Technology to the Rational Critique of Rationality”. *Social Epistemology*, 22: 5-28.
- Feenberg, Andrew (2011). “Modernity, Technology and the Forms of Rationality”. *Philosophy Compass*, 6/12: 865-873.
- Feenberg, Andrew (2014). *The Philosophy of Praxis. Marx, Lukács, and the Frankfurt School*. Londres-Nueva York: Verso.
- Feenberg, Andrew (2017a). “A Critical Theory of Technology”. En Ulrike Felt, Rayvon Fouché, Clark A. Miller, Laurel Smith-Doerr (eds.), *The Handbook of Science and Technology Studies* (pp. 635-663). Cambridge: The MIT Press.

- Feenberg, Andrew (2017b). *Technosystem. The social life of reason*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Feenberg, Andrew (2020). "Critical Constructivism: An Exposition and Defense". *Logos: a journal of modern society and cultura*, 19 (2) [En línea] <http://logosjournal.com/> [Consulta: 20 de octubre de 2020].
- Feng, Patrick y Feenberg, Andrew (2008). "Thinking About Design. Critical Theory of Technology and the Design Process". En Pieter E. Vermaas, Peter Kroes, Andrew Light, Steven A. Moore (eds.), *Philosophy and Design. From Engineering to Architecture* (pp. 105-118). Netherlands: Springer.
- Flanagin, Andrew; Flanagin, Craig; Flanagin Jon, (2010). "Technical code and the social construction of the internet". *New media y Society*, 12, 2: 179-196.
- Fortman, J.L.; Chhabra, Swapnil; Mukhopadhyay, Aindrila; Chou, Howard; Lee, Taek Soon; Steen, Eric y Keasling, Jay D. (2008). "Biofuel alternatives to ethanol: pumping the microbial well". *Trends in Biotechnology*, 26, 7: 375-381.
- Gamborg, C.; Millar, K.; Shortall, O. y Sandøe, P. (2012). "Bioenergy and land use: Framing the ethical debate". *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 25, 6: 909-925.
- Gardner, Timothy S.; Cantor, Charles y Collins, James J. (2000). "Construction of a genetic toggle switch". *Escherichia coli. Nature*, 403: 339-342.
- George, Kevin W.; Alonso-Gutierrez, Jorge; Keasling, Jay D. y Lee, Taek Soon (2014). "Isoprenoid Drugs, Biofuels, and Chemicals-Artemisinin, Farnesene, and Beyond". En J. Schrader y J. Bohlmann (eds.), *Biotechnology of Isoprenoids. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Vol 148. (pp. 355-389). Cham: Springer.
- Gibson, Daniel G.; Benders, Gwynedd A.; Andrews-Pfannkoch, Cynthia; Denisova, Evgeniya A.; Baden-Tillson, Holly; Smith, Hamilton O. (2008). "Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *Mycoplasma genitalium* genome". *Science*, 319: 1215-1220.
- Gibson, Daniel G.; Glass, John; Lartigue, Carole; Noskov, Vladimir; Chuang, Ray; Algire, Mikkel; Benders, Gwynedd; Venter, John Craig (2010). "Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome". *Science*, 329: 52-56.

- Gomiero, Tiziano (2015). "Are Biofuels an Effective and Viable Energy Strategy for Industrialized Societies? A Reasoned Overview of Potentials and Limits". *Sustainability*, 7: 8491-8521.
- Gomiero, Tiziano; Paoletti, Maurizio G.; Pimentel, David (2010). "Biofuels: efficiency, ethics, and limits to human appropriation of ecosystem services". *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 23, 5: 403-434.
- Gouveia, Luisa (2011). *Microalgae as a feedstock for biofuels*. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer.
- Gras, Carla y Hernández, Valeria (2016). "Hegemony, Technological Innovation and Corporate Identities: 50 Years of Agricultural Revolutions in Argentina". *Journal of Agrarian Change*, 16, 4: 675-683.
- Guyton, Kathryn Z.; Loomis, Dana; Grosse, Yann; El Ghissassi, Fatima; Benbrahim-Tallaa, Lamia; Guha, Neela *et al.* (2015). "Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate". *The Lancet*. [En línea] <https://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045%2815%2970134-8/full-text> (pp. 490-491).
- Habermas, Jürgen (1986). *Ciencia y técnica como ideología*. Madrid: Tecnos.
- Hagen, Kristin; Engelhard, Margret; Toepfer, Georg (eds.) (2016). *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Heidelberg New York Dordrecht London: Springer.
- Hamilton, Edward y Feenberg, Andrew (2005). "The Technical Codes of Online Education". *Techné*, 9, 1: 97-123.
- Heidegger, Martin (1997). *Filosofía, ciencia y técnica*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
- Hilpinen, Risto (1993). "Authors and Artifacts". *Proceedings of the Aristotelian Society*, 93: 155-178.
- Houkes Wybo, Kroes Peter; Meijers, Anthonie; Vermaas, Pieter E. (2011). "Dual-Nature and collectivist frameworks for technical artefacts: a constructive comparison". *Studies in History and Philosophy of Science* 42: 198-205.
- Hutchison III, Clyde A.; Chuang, Ray-Yuan; Noskov, Vladimir N.; Assad-Garcia, Nancy; Venter, John Craig (2016). "Design and

- synthesis of a minimal bacterial genome”. *Science*, 351 (6280); aad6253-1-aad6253-11.
- IEA (International Energy Agency) (2020). *Key World Energy Statistics 2020*. [En línea] <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020> [Consulta: 6 de agosto de 2020].
- iGEM (2021). “Registry of standard biological parts”. [En línea] http://parts.igem.org/Main_Page [Consulta: 2 de abril de 2021].
- IPCC (2007). *Climate Change 2007 – Mitigation of Climate Change*. En Bert Metz, Ogunlade Davidson, Peter Bosch, Rutu Dave, Leo Meyer (eds.), *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (pp. 809-822). Nueva York: Cambridge University Press.
- Karafyllis, Nicole C. (2003). “Renewable resources and the idea of nature – What has biotechnology got to do with it?”. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 16, 1: 3-28.
- Keller, Evelyn Fox (2002). *Making sense of life: explaining biological development with models, metaphors, and machines*. Cambridge, Massachusetts, and London, England: Harvard University Press.
- Keller, Evelyn Fox (2009). “What does synthetic biology have to do with biology?”. *BioSocieties*, 4: 291-302.
- Kirkpatrick, Graeme (2017). “Transforming Dystopia with Democracy: The Technical Code and the Critical Theory of Technology”. En Darrell P. Arnold y Andreas Michel (eds.), *Critical Theory and the Thought of Andrew Feenberg* (pp. 117-138). Cham: Palgrave, Mcmillan.
- Kroes, Peter (2012). *Technical artefacts: creations of mind and matter. A philosophy of engineering design*. Dordrecht Heidelberg New York London: Springer.
- Kroes, Peter y Meijers, Anthonie (2006). “The dual nature of technical artefacts”. *Studies in History and Philosophy of Science*, 37: 1-4.
- Lam, Carolyn M.C.; Godinho, Miguel; Martins dos Santos, Vítor A.P. (2009). “An introduction to synthetic biology”. En M. Schmidt, Alexander Kelle, Agomoni Ganguli-Mitra y Huib de Vriend (eds.), *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences* (pp. 23-48). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.

- Lartigue, Carole; Glass, John I.; Alperovich, Nina; Pieper, Rembert; Parmar, Prashanth P.; Venter, John Craig (2007). "Genome transplantation in bacteria: changing one species to another". *Science*, 317: 632-638.
- Lartigue, Carole; Vashee, Sanjay; Algire, Mikkel A.; Chuang, Ray-Yuan; Benders, Gwynedd A.; Glass, John I. (2009). "Creating bacterial strains from genomes that have been cloned and engineered in yeast". *Science*, 325: 1693-1696.
- Lawler, Diego (2010). "Intenciones y artificios". *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 14, 5: 117-124.
- Lee, Keekok (2005). *Philosophy and revolutions in genetics: Deep science and deep technology*. Basingstoke: Palgrave Macmillan.
- Lever-Tracy, Constance (2019). "Climate Change, Ethics, and Food Production". En David M. Kaplan y Paul B. Thompson (eds.), *Encyclopedia of Food and Agricultural Ethics* (pp. 448-455). Dordrecht: Springer.
- Levin, Sam (2019, 27 de marzo). "Monsanto founds liable for California man's cancer and ordered to pay \$80m in damages". *The Guardian*. [En línea] <https://www.theguardian.com/business/2019/mar/27/monsanto-trial-verdict-cancer-jury> [Consulta: 4 de septiembre de 2020].
- Lewens, Tim (2013). "From bricolage to BioBricks™: Synthetic biology and rational design". *Studies in History and Philosophy of Science. Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44 (4B): 641-648.
- Linares Salgado, Jorge E. (2018). "The promises of synthetic biology: new bioartefacts and their ethical and societal consequences". En *Philosophy of Engineering and Technology. Volume 24: Spanish Philosophy of Technology* (pp. 179-194). Cham: Springer.
- Linares Salgado, Jorge E. y Gonzalez Valerio, María A. (2016). "Hacia una ontología de la bioartefactualidad (primera parte)". En Jorge Enrique Linares y Elena Arriaga (coords.), *Aproximaciones interdisciplinarias a la bioartefactualidad* (pp. 79-107). México: UNAM.
- Longy, Françoise (2009). "How biological, cultural and intended functions combine". En Ulrich Krohs y Peter Kroes (eds.), *Functions*

- in biological and artificial worlds* (pp. 51-67). Londres: MIT Press.
- Mackenzie, Adrian (2010). "Design in synthetic biology". *BioSocieties*, 5: 180-198.
- Mackenzie, Adrian (2013). "Synthetic biology and the technicity of biofuels". *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 2: 190-198.
- Mackenzie, Adrian (2014). "Having an Anthropocene body: hydrocarbons, biofuels and Metabolism". *Body y Society*, 20,1: 3-30.
- Marcuse, Herbert (1993). *El hombre unidimensional. Ensayo sobre la ideología de la sociedad industrial avanzada*. Barcelona: Paneta-De Agostini.
- Martin, Vincent J.; Pitera, Douglas J.; Withers, Sydnor T.; Newman, Jack D.; Keasling, Jay D. (2003). "Engineering a mevalonate pathway in *Escherichia coli* for production of terpenoids". *Nature Biotechnology*, 21, 7: 796-802.
- McCarthy, Tom (2001). "The Coming Wonder? Foresight and Early Concerns about the Automobile". *Environmental History*, 6, 1: 46-74.
- McCullom, Thomas M. (2013). "Miller-Urey and beyond: What have we learned about prebiotic organic synthesis reactions in the past 60 years?". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41: 207-229.
- McLaughlin, Peter (2001). *What functions explain. Functional explanation and self-reproducing systems*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mitcham, Carl (1989). *¿Qué es la Filosofía de la Tecnología?* Barcelona: Anhoropos-Universidad del País Vasco.
- Mitcham, Carl (2002). "Do artifacts have dual natures? two points of commentary on the Delft Project". *Techné*, 6, 2: 93-95.
- Mitcham Carl y Schatzberg, Eric (2009). "Defining Technology and the Engineering Sciences". En Dov M. Gabbay, Paul Thagard and John Woods (eds.), *Handbook of the Philosophy of Science. Volume 9: Philosophy of Technology and Engineering Sciences* (pp. 27-63). North Holland: Elsevier.

- Monsanto (2001). Cuaderno Técnico N° 1. Evaluación de la seguridad de la soja Roundup Ready®, evento 40-3-2.
- Morange, Michel (2009a). "A Critical Perspective on Synthetic Biology". *International Journal for Philosophy of Chemistry*, 15, 1: 21-30.
- Morange, Michel (2009b). "History of Molecular Biology". En *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*. DOI: 10.1002/9780470015902.a0003079.pub2. John Wiley y Sons, Ltd: Chichester.
- Morange, Michel (2009c). "A new revolution? The place of systems biology and synthetic biology in the history of biology". *EMBO reports* 10: S50-S53.
- Mortimer, Jenny C. (2019). "Plant synthetic biology could drive a revolution in biofuels and medicine". *Experimental Biology and Medicine*, 244: 323-331.
- Mudge, Stephen M. (2008). "Is the use of biofuels environmentally sound or ethical?". *Journal of Environmental Monitoring*, 10: 701-702.
- Murphy, Denis J. (2007). *People, plants, and genes. The story of crops and humanity*. New York: Oxford University Press.
- Newell-McGlouhlin, Martina y Re, Edward (2006). *The evolution of Biotechnology. From Natufians to Nanotechnology*. Dordrecht: Springer.
- Nobeli, Irene; Favia, Angelo D.; Thornton, Janet M. (2009). "Protein promiscuity and its implications for biotechnology". *Nature Biotechnology*, 27, 2: 157-167.
- Noble, David F. (1999). *La religión de la tecnología. La divinidad del hombre y el espíritu de invención*. Buenos Aires: Paidós.
- Nuffield Council on Bioethics (2011). "Biofuels: Ethical issues. Nuffield Council on Bioethics. Oxfordshire: Nuffield Press". [En línea] <https://www.nuffieldbioethics.org/publications/biofuels> [Consulta: 30 de marzo de 2020].
- O'Malley, Maureen A.; Powell, Alexander; Davies, Jonathan F. y Calvert, Jane (2007). "Knowledge-making distinctions in synthetic biology". *BioEssays* 30: 57-65.
- Otero, Gerardo (2013). "El régimen alimentario neoliberal y su crisis: Estado, agroempresas multinacionales y biotecnología". *Antípoda. Revista de Antropología y Arqueología*, 17: 49-78.

- Oye, Kenneth A.; Wellhausen, Rachel (2009). "The Intellectual Commons and Property in Synthetic Biology". En M. Schmidt *et al.* (eds.), *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences* (pp. 121-140). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.
- Paddon, Chris J.; Keasling, Jay K. (2014). "Semi-synthetic artemisinin: a model for the use of synthetic biology in pharmaceutical development". *Nature Reviews Microbiology*, 12: 355-367.
- Palandri, Claire; Giner, Celine; Debnath, Deepayan (2019). "Technology, policy, and institutional Options". En Deepayan Debnath y Suresh Chandra Babu (eds.), *Biofuels, Bioenergy and Food Security. Technology, Institutions and Policies* (pp. 24-41). London-Oxford-Cambridge-San Diego: Academic Press, Elsevier.
- Parente, Diego (2014). "El estatuto de los bioartefactos. Intencionalismo, reproductivismo y naturaleza". *Revista de Filosofía*, 39, 1: 163-185.
- Parente, Diego (2018). "Synthetic Life: Organisms, Machines, and the Nature of Synthetic Biology Products". En *Philosophy of Engineering and Technology. Volume 24: Spanish Philosophy of Technology* (pp. 31-41). Cham: Springer.
- Parente, Diego y Crelier, Andrés (2015). *La naturaleza de los artefactos. Intenciones y funciones en la cultura material*. Buenos Aires: Prometeo.
- Pellegrini, Pablo A. (2013). *Transgénicos. Ciencia, agricultura y controversias en la Argentina*. Bernal: Universidad Nacional de Quilmes.
- Peralta-Yahya, Pamela P.; Zhang, Fuzhong; Del Cardayre, Stephen B.; Keasling, Jay D. (2012). "Microbial engineering for the production of advanced biofuels". *Nature*, 488: 320-328.
- Peretó, Juli (2016). "Erasing borders: A brief chronicle of early synthetic biology". *Journal of Molecular Evolution*, 83, 5-6: 176-183.
- Pinch, Trevor y Bijker, Wiebe (2012). "The social construction of facts and artifacts: or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other". En Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes and Trevor Pinch (eds.), *The social construction of technological systems (anniversary edition)* (pp. 11-44). Cambridge: The MIT Press.

- Pols, Auke y Spahn, Andreas (2019). *Biofuels: Ethical Aspects*. En David M. Kaplan y Paul B. Thompson (eds.), *Encyclopedia of Food and Agricultural Ethics* (pp. 274-280). Dordrecht: Springer.
- Porcar, Manuel y Peretó, Juli (2014). *Synthetic Biology. From iGEM to the artificial cell*. Dordrecht-Heidelberg-London-New York: Springer.
- Presidential Commission for the Study of Bioethics (2010). *New Directions: The ethics of synthetic biology and emerging technologies*. Washington, DC: Executive Branch of the US Government. [En línea] https://bioethicsarchive.georgetown.edu/pcsbi/sites/default/files/PCSBI-Synthetic-Biology-Report-12.16.10_0.pdf [Consulta: 4 de septiembre de 2019].
- Preston, Beth (2008). "The Shrinkage Factor: comment on Lynne Rudder Baker's 'The shrinking difference between artifacts and natural objects'". *American Philosophical Association Newsletter on Philosophy and Computers*, 8, 1: 26-28.
- Preston, Beth (2013). "Synthetic biology as red herring". *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44: 649-659.
- Preston, Christopher J. (2008). "Synthetic biology: Drawing a line in Darwin's sand". *Environmental Values*, 17: 23-40.
- Qian, Yili; McBride, Cameron; Del Vecchio, Domitilla (2018). "Programming Cells to Work for Us". *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1: 411-440.
- Renewable Fuels Association (2020). *Annual Fuel Ethanol Production*. [En línea] <https://ethanolrfa.org/statistics/annual-ethanol-production/> [Consulta: 4 de diciembre de 2020].
- Ro, Dae-Kyun; Paradise, Eric M.; Ouellet, Mario; Fisher, Karl J.; Newman, Karyn L.; Keasling, Jay D. (2006). "Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast". *Nature*, 440: 940-943.
- Rodríguez, Pablo E. (2016). "Sobre un nuevo tipo de cuasi-objetos. La artificialidad de la vida en el caso de la biología sintética". En Diego Lawler, Andrés Vaccari y Javier Blanco (comps.), *La técnica en cuestión. Artificialidad, cultura material y ontología de lo creado* (pp. 269-288). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Teseo; Universidad Abierta Interamericana.

- Rose, N. (2006). *The Politics of Life Itself: Biomedicine, Power, and Subjectivity in the Twenty-First Century*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Rubin, E. M. (2008). "Genomics of cellulosic biofuels". *Nature*, 454, 7206: 841-845.
- Sandrone, Darío (2017). "Realismo tecnológico y diseño antropométrico. Dos ontologías técnicas". En Diego Lawler, Andrés Vaccari y Javier Blanco (comps.), *La técnica en cuestión. Artificialidad, cultura material y ontología de lo creado* (pp. 289-312). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Teseo; Universidad Abierta Interamericana.
- Savage, David F; Way, Jeffrey y Silver, Pamela A. (2008). "Defossilizing Fuel: How synthetic biology can transform biofuel production". *JACS Chemical Biology* 3, 1: 13-16.
- Savakis, Philipp y Hellingwerf, Klaas (2015). "Engineering cyanobacteria for direct biofuel production from CO₂". *Current Opinion in Biotechnology*, 33: 8-14.
- Schmidt, Markus; Kelle, Alexander; Ganguli-Mitra, Agomoni; De Vriend, Huib (eds.) (2009). *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences* (pp. 121-140). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.
- Schmidt, Markus; Porcar, Manuel; Schachter, Vincent; Danchin, Antoine; Mahmutoglu, Ismail (2012). "Biofuels". En Markus Schmidt (ed.), *Synthetic Biology. Industrial and Environmental Applications* (pp. 7-66). Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Schrödinger, Erwin (1944). *What is life?* Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Schyfter, Pablo (2009). "The bootstrapped artefact: a collectivist account of technological ontology, functions, and normativity". *Studies in History and Philosophy of Science*, 40: 102-111.
- Schyfter, Pablo (2011). "Standing reserves of function: A Heideggerian reading of synthetic biology". *Philosophy y Technology*, 25: 199-219.
- Schyfter, Pablo (2012). "Technological biology? Things and kinds in synthetic biology". *Biology y Philosophy*, 27: 29-48.

- Shih, Patrick (2018). “Towards a sustainable bio-based economy: Redirecting primary metabolism to new products with plant synthetic biology”. *Plant Science*, 273: 84-91.
- Shortall, Olga (2019). “Agricultural Sciences and Ethical Controversies of Biofuels”. En David M. Kaplan y Paul B. Thompson (eds.), *Encyclopedia of Food and Agricultural Ethics* (pp. 84-90). Dordrecht: Springer.
- Sibilia, Paula (2005). *El hombre postorgánico. Cuerpo, subjetividad y tecnologías digitales*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- Simon, Herbert (1996). *The sciences of the artificial*. Cambridge-London: The MIT Press.
- Sperber, Dan (2007). “Seedless grapes: nature and cultura”. En Eric Margolis y Stephen Laurence (eds.), *Creations of the mind. Theories of artifacts and their representation* (pp. 124-137). New York: Oxford University Press.
- Stemerding, Dirk; De Vriend, H.; Walhout, B. and Van Est, R. (2009). “Synthetic Biology and the Role of Civil Society Organizations Shaping the Agenda and Arena of the Public Debate”. En M. Schmidt *et al.* (eds.), *Synthetic Biology. The technoscience and its societal consequences* (pp. 155-177). Dordrecht Heidelberg London New York: Springer.
- Thomasson, Amie L. (2003). “Realism and Human Kinds”. *Philosophy and Phenomenological Research*, 67: 580-609.
- Thompson, Paul B. (2008a). “The agricultural ethics of biofuels: a first look”. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 21: 183-198.
- Thompson, Paul B. (2008b). “Agricultural biofuels: Two ethical issues”. En Allan Eaglesham, Steven A. Slack and Ralph W.F. Hardy (eds.), *NABC Report 20: Reshaping American Agriculture to Meet its Biofuel and Biopolymer Roles* (pp. 145-155). [En línea] <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/51272> [Consulta: 23 de marzo de 2020].
- Thompson, Paul B. (2012a). “Synthetic biology needs synthetic bioethics”. *Ethics, Policy y Environment*, 15: 1-20.
- Thompson, Paul B. (2012b). “The agricultural ethics of biofuels: climate ethics and mitigation arguments”. *Poiesis Prax*, 8: 169-189.

- Tilman, David; Socolow, Robert; Foley, Jonathan A.; Hill, Jason; Larson, Eric; Lynd, Williams, Robert (2009). "Beneficial biofuels- The food, energy, and environment trilemma". *Science*, 325: 270-271.
- UCSD (2021). "Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego. The Keeling Curve. Institution of Oceanography at UC San Diego". [En línea] <https://keelingcurve.ucsd.edu/> [Consulta: 1 de abril de 2021].
- Vaesen, Krist (2011). "The functional bias of the dual nature of technical artefacts program". *Studies in History and Philosophy of Science*, 42: 190-197.
- Van den Belt, Henk (2009). "Philosophy of Biotechnology". En *Handbook of the Philosophy of Science. Volume 9: Philosophy of Technology and Engineering Sciences* (pp. 1301-1340). Burlington: Elsevier.
- Vermaas Pieter E. y Houkes, Wybo (2006). "Technical functions: a drawbridge between the intentional and structural natures of technical artefacts". *Studies in History and Philosophy of Science*, 37: 5-18.
- Vega Encabo, Jesús (2009). "Estado de la cuestión: Filosofía de la tecnología". *Theoria*, 66: 323-341.
- Way, Jeffrey C.; Collins, James J.; Keasling Jay, D. y Silver, Pamela A. (2014). "Integrating biological redesign: Where synthetic biology came from and where it needs to go". *Cell*, 157: 151-161.
- Wenz, Peter S. (2009). "Energy". En J. Baird Callicott y Robert Frode-man (eds.), *Encyclopedia of Environmental Ethics and Philosophy* (pp. 305-309). Farmington Hills: Macmillan a part of Gale, Cengage Learning.
- Winner, Langdon (1999). "Do Artifacts have Politics?". En Donald MacKenzie y Judy Wajcman (eds.), *The Social Shaping of Technology* (pp. 28-41). Philadelphia, PA: Open University Press.
- Zargar, Amin; Bailey, Constance B.; Haushalter, Robert W.; Eiben, Christopher.; Katz, Leonard; Keasling, Jay D. (2017). "Leveraging microbial biosynthetic pathways for the generation of 'drop-in' biofuels". *Current Opinion in Biotechnology*, 45: 156-163.
- Ziman, John (2003). "Ciencia y sociedad civil". *Isegoría*, 28: 5-17.

Colección Tesis

Títulos publicados (disponibles en

<https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/553>)

Participación política femenina: escenarios, prácticas e identidades en el radicalismo y el peronismo (Córdoba, 1945-1955)

Marina Inés Spinetta

Con la gente adentro. Apuntes para pensar la inclusión social en la producción del hábitat. La experiencia de Bariloche

Virginia Martínez Coenda

¿Qué puede un espacio? Sacrificio ambiental y subjetividades disidentes en Ituzaingó Anexo (Córdoba, Argentina)

Fernando Vanoli

Reformas políticas en la Córdoba reciente (2001-2008): sus efectos sobre el sistema político-electoral provincial

Nadia Kohl

Escuela y niñez: conflictividades cotidianas y relaciones sociales en contextos de pobreza urbana

Gustavo Enrique Rinaudo

Las implicancias de la Unión Europea en la política exterior de España (1996-2004): el tratamiento de las migraciones en las relaciones bilaterales con Ecuador

Silvana E. Santi Pereyra

La palabra, la política, la vida. *Estética y política* en las trayectorias y producción intelectual de Eduardo Galeano y Francisco Urondo: 1955-1976

Gabriel Montali

“Me voy para estudiar, estudio para volver”. Un estudio sobre trayectorias educativas con jóvenes de una localidad del interior del sur cordobés: entre la universidad, el pueblo y el trabajo

Carla Falavigna

Editoriales literarias en el cambio de siglo: entre el mercado, la autogestión y el disfrute cultural

Lucía Coppari

Territorialidad y resistencias campesinas: el conflicto de Los Leones (Mendoza, Argentina)

Gabriel Liceaga

Literatura y narcotráfico en Colombia (1994-2011). La construcción discursiva de la violencia en la novela colombiana

Vanessa Solano Cohen

Escuela, Estado y sociedad: una etnografía sobre maestras de la Patagonia

Miriam Abate Daga

Oficialismo y oposición en gobiernos posneoliberales en el Cono Sur: los casos de Kirchner-Argentina y Tabaré Vázquez-Uruguay

Iván Tcach

Prácticas de resistencia de los productores familiares en el agro uruguayo

Virginia Rossi Rodríguez

Los lineamientos y estrategias del desarrollo del Banco Interamericano de Desarrollo 1960-2014. Análisis crítico

Guillermo Jorge Inchauspe

¿Qué es la escuela secundaria para sus jóvenes? Un estudio sociohermenéutico sobre sentidos situados en disímiles condiciones de vida y escolaridad

Florencia D'Aloisio

Estrategias de organización político-gremial de secundarios/as: prácticas políticas y ciudadanía en la escuela

Gabriela Beatriz Rotondi

“No era solo una campaña de alfabetización”. Las huellas de la CREAM en Córdoba

Mariana A. Tosolini

El turno noche: tensiones y desafíos ante la desigualdad en la escuela secundaria.

Estudio etnográfico en una escuela de la provincia de Córdoba

Adriana Bosio

El Partido Nuevo de Córdoba. Origen e institucionalización (2003-2011)

Virginia Tomassini

La cirugía estética y la normalización de la subjetividad femenina. Un análisis textual

Marcelo Córdoba

La extensión rural desde la comunicación. Los extensionistas del Programa ProFeder del INTA en Misiones frente a sus prácticas de comunicación con agricultores

Francisco Pascual

Artes de hacer en Encuentros Culturales de la Provincia de Córdoba, 2010- 2013

Florencia Páez

Estados locales y alteridades indígenas: sentidos sobre la inclusión habitacional en El Impenetrable

Cecilia Quevedo

La integración de la Región Norte de San Juan y la IV Región de Chile (La Serena y Coquimbo)

Laura Agüero Balmaceda

Las formas de hacer política en las elecciones municipales 2007 de Villa del Rosario

Edgardo Julio Rivarola

Análisis de una estrategia didáctica y de los entornos digitales utilizados en la modalidad B-Learning

Liliana Mirna González

Enseñar Tecnología con TIC: Saberes y formación docente

María Eugenia Danieli

De vida o muerte. Patriarcado, heteronormatividad y el discurso de la vida del activismo “Pro-Vida” en la Argentina

José Manuel Morán Faúndes

Lógica del riesgo y patrón de desarrollo sustentable en América Latina. Políticas de gestión ambientalmente adecuada de residuos peligrosos en la ciudad de Córdoba (1991-2011)

Jorge Gabriel Foa Torres

El neoliberalismo cordobés. La trayectoria identitaria del peronismo provincial entre 1987 y 2003

Juan Manuel Reynares

Marxismo y Derechos Humanos: el planteo clásico y la revisión posmarxista de Claude Lefort

Matías Cristobo

El software libre y su difusión en la Argentina. Aproximación desde la sociología de los movimientos sociales

Agustín Zanotti

Democracia radical en Habermas y Mouffe: el pensamiento político entre consenso y conflicto

Julián González

Radios, música de cuarteto y sectores populares. Análisis de casos. Córdoba 2010-2011

Enrique Santiago Martínez Luque

Soberanía popular y derecho. Ontologías del consenso y del conflicto en la construcción de la norma

Santiago José Polop

Cambios en los patrones de segregación residencial socioeconómica en la ciudad de Córdoba. Años 1991, 2001 y 2008

Florencia Molinatti

Seguridad, violencia y medios. Un estado de la cuestión a partir de la articulación entre comunicación y ciudadanía

Susana M. Morales

Reproducción alimentaria-nutricional de las familias de Villa La Tela, Córdoba

Juliana Huergo

Witoldo y sus otros yo. Consideraciones acerca del sujeto textual y social en la novelística de Witold Gombrowicz

Cristian Cardozo

Género y trabajo: Mujeres en el Poder Judicial

María Eugenia Gastiazoro

Luchas, derechos y justicia en clínicas de salud recuperadas

Lucía Gavernet

Transformaciones sindicales y pedagógicas en la década del cincuenta. Del ocaso de la AMPC a la emergencia de UEPC

Gonzalo Gutiérrez

Estrategias discursivas emergentes y organizaciones intersectoriales. Caso *Ningún Hogar Pobre en Argentina*

Mariana Jesús Ortecho

Vacilaciones del género. Construcción de identidades en revistas femeninas

María Magdalena Uzín

Literatura / enfermedad. Escrituras sobre sida en América Latina

Alicia Vaggione

El bloquismo en San Juan: Presencia y participación en la transición democrática (1980-1985)

María Mónica Veramendi Pont

La colectividad coreana y sus modos de incorporación en el contexto de la ciudad de Córdoba. Un estudio de casos realizado en el año 2005

Carmen Cecilia González

“Se vamo’ a la de dios”. Migración y trabajo en la reproducción social de familias bolivianas hortícolas en el Alto Valle del Río Negro

Ana María Ciarallo

La política migratoria colombiana en el período 2002-2010: el programa Colombia Nos Une (CNU)

Janneth Karime Clavijo Padilla

El par conceptual pueblo - multitud en la teoría política de Thomas Hobbes

Marcela Rosales

El foro virtual como recurso integrado a estrategias didácticas para el aprendizaje significativo

María Teresa Garibay

“Me quiere... mucho, poquito, nada...”. Construcciones socioafectivas entre estudiantes de escuela secundaria

Guadalupe Molina

Biocombustibles argentinos: ¿oportunidad o amenaza? La exportación de biocombustibles y sus implicancias políticas, económicas y sociales. El caso argentino

Mónica Buraschi

Educación y construcción de ciudadanía. Estudio de caso en una escuela de nivel medio de la ciudad de Córdoba, 2007-2008

Georgia E. Blanas