Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco.

La complejidad de la innovación tecnológica:
Una aproximación del uso de los Sistemas Complejos Adaptables en el estudio de la Innovación Tecnológica

Tesis que presenta el
Lic. Ricardo Artemio Chávez Meza
para obtener el grado de
Mtro. en Economía y Gestión del Cambio Tecnológico.

Director: Ángel Arturo Lara Rivero

30 de junio de 2011

DEDICATORIA

Para mis maestros.

Los primeros y primordiales: mis papás. Delfina y Artemio. Maestros de vida. Gracias.

Mis hermanos, Rosy, Marcos y Zaide: maestros de juego y amor. Los amo.

Mis tíos y padrinos, Pirris, Eneida, Blanca, Noemí, Carmelita, Carmen, Soco, Johnny, Rafael, Cuco, Amaranto, Simón y Conrado, maestros todos de cuidados y procuración de quienes aprendí que la familia es algo más profundo que el lazo sanguíneo. La ausencia de los que ya no están pesa tanto como el cariño que nos brindaron. Muchas gracias por su amor y ejemplo.

Betza, maestra de amor, solidaridad y cuidado. Que este escrito sea la película de un cuadro que te guste.

Mis sobrinos, Arielito, Karime, Iñaki, Arantza y Ricardo Marcos. Maestros de ternura y perenne sorpresa. Besos.

Mis otros hermanos, Carlos Alberto, Roberto, Rodolfo, Jesús, Juan Carlos, Miguel, José Luis, Adri, Alf, Paula, Silvino, Ernesto, Marco, Ricardo, Aura, Jair y Carlos. Maestros de crítica profunda, consciente y constructiva, maestros de amor fraternal.

Mis compas de lucha, Sarita y Agustín. Maestros de libertad, sensibilidad, inteligencia y valor. Venceremos.

Mis amigos de universidad, Ame, Karina, Jessica, Adán, Betanzos, Pepe Toño, Toño, Froy, Loth y Julio. Maestros de diversión.

Dianita, compañera eterna de ensayo y error. Maestra de contemplación y creación estética.

Mis amigos de maestría, Elisa, Juan, Cristina, Alex, Anita, Elsita y Ángel. Maestros de constancia, amistad y talento. Las veladas y desveladas siempre son mejores con ustedes.

A todos mis meseros académicos, pero en especial a los que me marcaron de forma particular. Dr. Enrique Dávila, sus clases fueron mis primeras clases de economía y sin duda de las mejores. Dr. Eloy González Marín, gracias por su confianza, consejos, anécdotas y conocimientos, su amistad me enorgullece profundamente. Dra. Irma P. Juárez, gracias por mostrarme el valor de la interdisciplina y del sentido humano y ecológico al que debe obedecer la academia; como siempre estoy a sus órdenes. Dr. Daniel Villavicencio, su crítica siempre fresca y apoyo son imprescindibles. Dr. Arturo Lara, inefable todo lo que le he aprendido y felizmente lo sigo haciendo.

A todos mis compañeros de lucha, la lista es afortunadamente enorme. Maestros de valor, esperanza y honestidad.

A todos los milicianos, base de apoyo y simpatizantes del EZLN. Maestros de dignidad.

Mayra, maestra de dura crítica, valor, fuerza, aleatoria asertividad y esperanza. Compañera de la batalla más profunda.

Vale, maestra de tierna fuerza, cariño incondicional, imaginación y significado. Sólo evocar tu nombre me hace sonreír.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es resultado del apoyo directo e indirecto de muchas personas e instituciones a quienes les agradezco su participación. En primer lugar al departamento de Economía, a la Secretaría Académica, a Sistemas Escolares y a la unidad de Servicio Social de la UAM Azcapotzalco, quienes al inicio de mis estudios de Maestría agilizaron de forma extraordinaria los trámites para que pudiera ingresar a este programa de estudios. Muchas gracias. Al Dr. Eloy González y a la Dra. Irma Juárez quienes me brindaron su confianza con su recomendación para que continuara mis estudios.

Al Dr. Daniel Villavicencio que sin duda fue el mejor coordinador del programa de estudios que puede tener. Su disciplina, convicción, atención, tolerancia y alegría permitieron que mi estancia en el programa fuera provechosa y agradable.

A mis compañeros de estudios, Elisa Flores, Juan Reyes, Cristina Garza, Alejandro Moreno, Elsa Prado, Ángel González y René Ventura, por su apoyo, crítica y gusto por compartir ideas, información y recursos.

A los lectores del presente trabajo, Mtro. Juan Reyes Álvarez por sus puntualizaciones, correcciones tanto de forma como de fondo y su generosa referencia para localizar información y programas; al Mtro. Alberto Morales Sánchez por su apoyo y fina lectura que permitió enmendar errores pero sobretodo repensar contenidos; al Mtro. Fernando Jiménez Tovar por su plena disposición y refinamiento de todo el trabajo pero en particular sobre el contenido formal; sus apreciaciones fueron clave para generar confianza en el camino andado.

Al los Drs. Manuel Soria y Arturo Torres, que como coordinadores del programa siempre promovieron las condiciones para que concluyera mi proceso de formación.

Al pueblo mexicano, que por medio de la UAM y el CONACYT, financió mis estudios. Mi desempeño profesional está comprometido en consecuencia.

Al Dr. Ángel Arturo Lara Rivero, quien no sólo me acercó al estudio de la complejidad, sino que además, me permitió con absoluta libertad realizar mi trabajo. Espero que en estas páginas se encuentre reflejado un poco del análisis crítico, profundo, intelectualmente ambicioso, honesto, preciso, consistente, innovador y estético que caracteriza el trabajo del Dr. Lara.

Desde luego, y a pesar de todos los valiosos comentarios, ideas y correcciones que tuvieron a bien procurarme, los errores que contenga este trabajo son de mi propia responsabilidad.

CONTENIDO

Dedicatoria 1
Agradecimientos 2
Contenido 3
Introducción 5
Capítulo 1. El cuerpo teórico de la innovación tecnológica: temas, enfoques, desarticulación y complejidad. 10
Introducción 10
1.1. El esquema básico de la innovación tecnológica. 10
1.1.1. Identificación de necesidades. 11
1.1.2. El diseño 13
1.1.3. La investigación. 13
1.1.4. La innovación. 14
1.1.5. La difusión. 16
1.2. Los enfoques de la innovación y su desarticulación. 19
1.2.1. Perspectiva micro. 19
1.2.2. Perspectiva meso. 22
1.2.3. Perspectiva macro 23
1.2.4. La complejidad del cuerpo teórico de la innovación tecnológica y su desarticulación. 25
Capítulo 2. Los sistemas complejos Adaptables 28
Introducción. 28
2.1 Las aportaciones de H. Simon. 29
2.2. Las aportaciones de J. Holland. 31
2.2.1. Propiedades de los SCA 33
2.2.2. Emergencia de reglas. 37
2.2.2.1. Sistema de desempeño. 40
2.2.2.2. Algoritmo de asignación de valor. 41
2.2.2.3. .Descubrimiento de reglas. 44
2.3. Las aportaciones de Kauffman 46
2.4. Las aportaciones de la Teoría de Redes. 52
Capítulo 3. Los Sistemas Complejos Adaptables frente a los temas de la innovación tecnológica. 59
Introducción. 59
3.1. La modularidad. 60
3.2. La teoría de la firma basada en el conocimiento 71
(La perspectiva de la resolución del problema) 71
3.3. El nivel de complejidad y los elementos vinculados a la innovación tecnológica. 75
3.3.1. Contratos 76
3.3.2. Reglas 78
3.3.3. Aprendizaje 80
3.3.4. Capacidades 83
3.3.5. Proveeduría 86
3.3.6. Taxonomía de Pavitt 87
3.4. Difusión tecnológica. 93

Capítulo 4. Modelo de innovación tecnológica a partir del uso de los SCA. 96
Introducción 96
4.1. Modelo básico. 96
4.1.1. Supuestos fundamentales: 96
4.1.2. Supuestos de perfecta descomposición 98
4.2. Desarrollo 99
4.2.1. Agentes, relaciones y configuraciones genéticas 99
4.2.2. Sistema de desempeño. 100
4.3. Formación de reglas. 101
4.4. Función y componente 118
4.5. Demand pull 126
4.6. Technology Push. 133
4.6.1. Caso 1. Economía de recursos. 133
4.6.2. Caso 2. Innovación por incremento de mercados. 136
4.6.3. Caso 3. Cambios en las fuerzas productivas naturales. 140
4.6.3.1. Efecto sobre x1. 141
4.6.3.2. Efecto sobre x_2, $x_{2.1}$, a_1 y a_2. 142
4.6.3.3. Efecto sobre x_3. 143
4.6.4. Efectos sobre las poblaciones. 144
4.7. Complejidad, integración teórica y modularidad. 145
Conclusiones. 152
Bibliografía 157
Índice de Figuras 162
Índice de tablas 164

INTRODUCCIÓN

Pocos temas en la economía tienen tanta importancia intelectual y para el diseño de políticas económicas como el de la innovación tecnológica. Su valor radica en dos grandes ejes. El primero es, que la innovación asociada a los cambios cualitativos del capital físico de la economía permite incrementar la productividad y en consecuencia aumentar el nivel de riqueza de una economía (de ahí su importancia en términos de diseño de política) y el segundo es, que abre un profundo debate sobre el estudio de la economía en cuanto a sus métodos de análisis, la relevancia de cada uno de sus temas y, por supuesto y sobre todo, a sus conclusiones.

Si bien el cuerpo teórico de la innovación es relativamente abundante, en realidad, es una corriente en construcción. A pesar de que prácticamente todos los grandes estudiosos de la economía han hecho énfasis en mayor o menor medida de su significado para la explicación del fenómeno económico, el estudio sistemático apenas cuenta con unas cinco décadas de discusión.

Las fuentes, perspectivas y enfoques que se han desarrollado han propuesto ya una buena cantidad de conocimientos que gradualmente se han ido incorporando en las distintas corrientes de estudio económico. Incluso, es posible identificar a la corriente de la Economía Evolutiva (que tiene a la innovación tecnológica en particular y al cambio, en general, como su eje central) como un programa de investigación que compite con las distintas escuelas de estudio económico, aunque su participación aún es menor. En prácticamente ninguna licenciatura se estudia esta corriente, ni existe un libro de texto que organice sistemáticamente el cuerpo teórico de la misma. Las razones de esta marginalidad relativa son variadas, sin embargo, una de ellas es que no se ha trabajado en la formalización del conjunto del programa que permita ponerlo a discusión con los grandes avances que han tenido otras corrientes en este sentido. Esto dicho, por supuesto, sin menoscabo de la brillante aportación que han hecho distintos colegas, ni en los profundos avances cualitativos que se muestran en múltiples textos que se asumen como parte de esta corriente.

Por otro lado, y casualmente, a lo largo de las mismas cinco décadas, ha emergido todo un programa de investigación matemático que estudia a la complejidad y los sistemas no-lineales en su carácter general, dicho programa ha evolucionado con distintos nombres, teoría del caos, teoría de fractales, teoría de redes, etc. (Erdős y Rényi, 1959, Milgram, 1967, Holland, 1975, Kauffman, 1993, Strogatz, 1994, Holland, 1996, Mandelbrot, 1997, Watts, 1999, Barabási, 2002). Sin embargo, a lo largo de sus avances, esta academia especializada ha optado gradualmente por definir al tema de la complejidad como el eje central de análisis. Un rasgo interesante de esta corriente matemática, es que se ha nutrido de múltiples fuentes (desde la biología o la física, hasta la propia economía o la neurociencia) y gran parte de su desarrollo está asociado a la capacidad de cálculo que las computadoras ofrecen y que en el pasado era prácticamente imposible de realizar. Así, este programa de investigación ha sustituido al cálculo lineal e incluso a las ecuaciones diferencias (las relaciones funcionales más avanzadas para el estudio del cambio) por modelos de simulación por computadora.

Distintos economistas han avanzado en la formulación de sus ideas sobre temas propios de la innovación tecnológica con base en algunas aportaciones de este programa de estudio matemático con resultados bastante alentadores (Potts, 2000, Baldwin C. J., 2000, Frenken, 2006). Sin embargo, los temas propios de la innovación tecnológica en su conjunto no han sido abordados y convine preguntarse si es posible integrar este conjunto de conocimientos aprovechando como eje articulador a los avances de la teoría de la complejidad, puesto que ésta última es capaz de explicar formalmente tanto la emergencia como el cambio que son los dos elementos de abstracción básicos de la innovación y que no han sido resueltos por otras teorías económicas. Si bien este trabajo no pretende hacer una integración exhaustiva de los temas de innovación tecnológica, si busca ofrecer un acercamiento en este sentido en el nivel más estudiado por esta corriente: el microeconómico.

De esta manera cabe preguntarse si es posible encontrar un modelo consistente que abstraiga los elementos verosímiles de los distintos enfoques de la teoría de la innovación tecnológica de tal forma que permita integrar el cuerpo teórico de conocimientos desarrollada sobre la misma. Personalmente, creo que en los sistemas complejos adaptables (SCA) podremos encontrar una respuesta de este tipo. En todos los modelos se observa a la innovación tecnológica como un sistema y además, en

prácticamente todas las lecturas sobre la innovación se resaltan los elementos de complejidad e incertidumbre del proceso de cambio tecnológico que son características fundamentales de los SCA.

Puesto que el conjunto de temas sobre la innovación tecnológica es variado y en apariencia consistente, no se encuentra un hilo conductor que los integre y permita con ello explicaciones más robustas y ordenadas que jerarquicen su significación y construyan puentes de discusión con el resto de las escuelas. Entonces, para ordenar las aportaciones teóricas sobre la innovación tecnológica, en el primer capítulo de este trabajo, se presentarán los principales temas de la innovación tecnológica a partir de un diseño tipo ideal del proceso de innovación básica. Posteriormente, se mostrarán algunas de las principales aportaciones de los distintos enfoques ordenados a partir de los tres niveles tradicionales de análisis del fenómeno económico: los ámbitos vinculados con la microeconomía, la mesoeconomía y la macroeconomía. Ello nos permitirá contar con un conjunto de conocimientos que será el contenido teórico de un modelo de carácter general que se describirá en el último capítulo. Además, como espero demostrar, este cuerpo de conocimientos no se encuentra articulado y ello imposibilita una competencia de explicación con otras escuelas de pensamiento económico a pesar de que es posible encontrar en la teoría de la innovación respuestas significativas superiores que en la teoría neoclásica.

En el segundo capítulo, se presentarán los elementos que consideré más significativos de la aportación de los sistemas complejos, a saber, las nociones pioneras de H. Simon sobre estudio de la economía como un sistema complejo; las aportaciones de J. Holland tanto en la descripción de los Sistemas Complejos Adaptables (SCA) como en su modelo dinámico de aprendizaje y adaptación; las aportaciones de S. Kauffman referentes a la graduación de la complejidad y la dinámica de cambio en la vecindad y; algunos temas referentes a la Teoría de Redes que permiten definir algunas reglas aceptadas de los sistemas, limitar los alcances los mismos, utilizar operadores para explicar su dinámica y presentar fenómenos particulares de los sistemas. La intención de este capítulo será entonces, presentar un acercamiento de conjunto de herramientas teórico-matemáticas que resultan adecuadas para explicar el fenómeno de la innovación. El hecho de intentar hacer una formalización del tema de la innovación no es menor, la capacidad de poder formalizar ideas, permite por un lado, afinarlas y

reconstruirlas en sus formas más puras, por otro lado, logra revelar relaciones que no son apreciadas en principio así como determinar las variables más relevantes en términos explicativos. Además, permite confrontar las ideas con otras corrientes a partir de un lenguaje común y aceptado por todos.

En el tercer capítulo, se busca sintetizar los temas descritos en el primer capítulo con el lenguaje y reglas aportadas por las cuatro líneas que se describen en el segundo a partir del criterio de grado de complejidad. Para ello, a partir del estudio de la modularidad se introducirá la metáfora genética de la descripción de un producto (misma que posteriormente se extenderá a los distintos agentes y al estado de la naturaleza), simultáneamente, se analizará a la modularidad para contrastarla tanto con un sistema simple como con uno integrado o altamente complejo. Posteriormente, y ya definido el grado de la complejidad, se utilizará la teoría de la empresa basada en el conocimiento (desde una perspectiva de resolución del problema tecnológico) para presentar tres niveles de complejidad: bajo, medio y alto a partir de la propuesta que realiza Kuaffman (1993) para medir el grado de complejidad con un parámetro *K* que se explicará en su momento. Estos niveles, me permitirán ordenar los distintos temas de la innovación y mostrar como el grado de complejidad de un sistema determina los métodos para resolver problemas y ubica en las dimensiones pertinentes a cada tema de la innovación.

Por último, y con base en las herramientas de modelación presentadas en el segundo capítulo y los conocimientos cualitativos presentados por los distintos enfoques de la innovación tecnológica ordenados en el tercero, se esbozará un modelo de innovación tecnológica que permitirá observar la emergencia de nuevas tecnologías y el efecto que tienen sobre el conjunto del sistema. Para este caso, la propuesta de sintaxis ofrecida por Holland (1996) será el pilar de la narrativa. Naturalmente, se dejarán de lado una inmensa cantidad de conceptos que son propios de la naturaleza del análisis económico puesto que en este ejercicio de abstracción sólo se busca introducir un hilo conductor que cruce a los temas de la innovación tecnológica. Como podrá notar el lector, este modelo atiende principalmente al nivel microeconómico (aunque se tocan temas meso y macro) puesto que es en este espacio donde más avance ha presentado el estudio de la innovación.

Se espera que este trabajo sirva para justificar la importancia que tiene el análisis de los SCA en el tema de la innovación tecnológica y de la Economía Evolutiva en su conjunto; permita al lector no especializado conocer la sintaxis, principales conceptos y algunas reglas de los sistemas complejos; y estimular con la crítica y la precisión de las ideas aquí propuestas a una profundización y extensión de este programa de investigación.

CAPÍTULO 1. EL CUERPO TEÓRICO DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA: TEMAS, ENFOQUES, DESARTICULACIÓN Y COMPLEJIDAD.

INTRODUCCIÓN

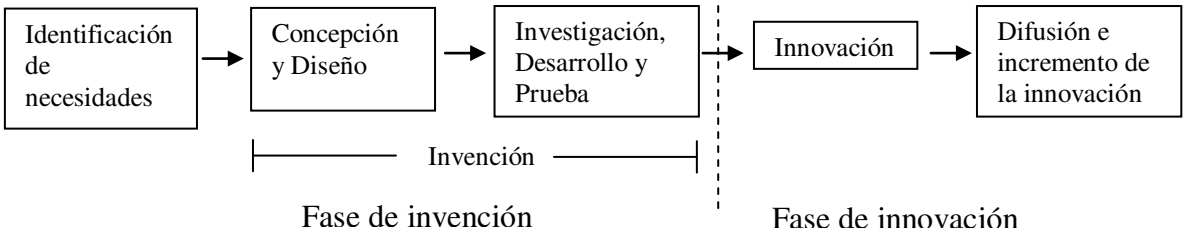
En este capítulo se intentará responder si el cuerpo teórico de la innovación tecnológica, a pasar de ser robusto, pude considerarse como una unidad en la que todos los elementos relevantes estén conectados para explicar el fenómeno de la innovación en su conjunto. Así, se presentarán los principales temas de la innovación tecnológica a partir de un diseño tipo ideal del proceso de innovación básica. Posteriormente, se mostrarán algunas de las principales aportaciones de los distintos enfoques ordenados a partir de los tres niveles tradicionales de análisis del fenómeno económico: los ámbitos de la innovación tecnológica vinculados con la microeconomía, la mesoeconomía y la macroeconomía. Esto permitirá mostrar por un lado que, aunque la literatura de la innovación tecnológica es amplia y profunda, aún se presenta como un conjunto de temas desarticulados y por el otro, mostrar que la propia naturaleza del tema es compleja y se requiere de instrumentos adecuados para su formalización y posible integración.

1.1. EL ESQUEMA BÁSICO DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.

El estudio de la innovación tecnológica tiene muchas aristas. No solo por el conjunto de temas que contiene o que pueden ser estudiados, sino además, por el propio proceso de innovación (como objeto de estudio), el cual consta de un amplio conjunto de elementos en el que interactúan distintos agentes en momentos distintos, y ello lo provee de una naturaleza compleja. La innovación tecnológica puede ser un proceso por así llamarlo "natural", en el que dentro de una empresa (principal espacio de generación de la innovaciones, aunque existen otros) se pueden realizar mejoras en las técnicas por medio de una proceso dinámico de adaptación regulado por el aprendizaje tanto de los agentes como de la organización. Sin embargo, este proceso de innovación -que es el típico observado por Arrow (1962) donde describe el *learning by doing* que, aunque es

común, no explica las innovaciones que contengan un mayor grado de valorización[1] ya sea para las empresas o para los consumidores, ni la emergencia de las innovaciones radicales- sólo es una parte de la ya significativa literatura que se especializa en el estudio de la innovación tecnológica, a tal grado que es posible ilustrar el proceso de innovación tecnológica en un esquema más amplio y que en su forma básica es el siguiente:

Fig. 1. Esquema básico de la innovación.



De tal forma que el proceso de innovación puede dividirse en dos fases, una de *exploración* en la que se identifican algunas necesidades a satisfacer; se concibe y diseña el producto o la tecnología que posiblemente las satisfaga y; se realizan las investigaciones, desarrollos y pruebas necesarias para realizar la invención. Y una de *explotación*, en la que se genera la innovación, se difunde y se perfecciona.

1.1.1. Identificación de necesidades.

En la primera fase, desde el punto de vista del que genera la innovación (por ejemplo, la empresa), se identifican las necesidades tanto internas como externas.

[1] El valor (*value* en ingles) es un concepto difícil de definir por las distintas concepciones que tiene implícito dependiendo el enfoque que sea utilizado, por ejemplo, desde el enfoque neoclásico el valor puede interpretarse como el resultado del producto de las cantidades de los bienes o servicios por el precio de los mismos; desde una concepción marxista el valor (de cambio) es el tiempo de trabajo socialmente necesario e incorporado y materializado en un producto o el grado de satisfacción que se produce por el consumo del mismo (valor de uso); financieramente, un valor se refiere al activo de una empresa que cotiza en la bolsa; matemáticamente en una cifra cardinal asignada a una variable, dada una escala numérica previamente convenida; socialmente se refiere a aspiraciones o comportamientos que definen distintos grupos sociales, etc. Por lo tanto, el concepto puede generar confusiones al ser usado, sin embargo, a lo largo de este trabajo será utilizado por dos razones, a) tiene implícito una carga positiva apreciada por los agentes al moverse desde alguna condición inicial a otra diferente y b) simultáneamente es tanto un indicador de grado como de posición. Así, en este trabajo se entenderá como valor a todo aquello que incrementa la conveniencia de un agente o un grupo.

Internamente se puede innovar para hacer más eficiente el proceso de producción, para reducir sus costos, para hacerlo más rápido, para incrementar la competencia o el volumen de la producción, etc. Estas necesidades internas que incentivan al generador de las innovaciones a explorar nuevas opciones tienen, en general, dos motivos: el primero es uno de carácter heurístico, es decir, poder encontrar nuevos procedimientos para resolver problemas específicos en la producción y el segundo es de sobrevivencia, es decir, ante la posibilidad de la competencia o de cambios en el ambiente (cambios en los costos de factores, cambios de reglas, alteraciones de los precios, emergencia de competencia secundaria, desgaste del producto, etcétera) los agentes innovadores se encuentran obligados a realizar cambios consecuentes con los cambios externos.

Las necesidades externas tienen que ver con la identificación de los distintos requerimientos que los usuarios de las innovaciones demandan. La naturaleza de estas necesidades es diversa. Podemos identificar, usando como criterio al tipo de usuarios, por lo menos cuatro:

a) Las necesidades de las personas (ya sean básicas, secundarias o subjetivas)
b) Las necesidades de las empresas (proveeduría y servicios auxiliares)
c) Las de los gobiernos (administrativos y militares)
d) Las sociales (bienes públicos, salud y medio ambiente)

La identificación de las necesidades es el primer paso en el proceso de innovación y aunque pareciera una trivialidad el proceso para hacerlo es en realidad bastante complejo puesto que requiere tanto de capacidades de detección de dichas necesidades como un modelo interno que configure *ex ante* una realidad problemática que requiere una solución.

Por otro lado, al identificar las necesidades, el generador de la innovación buscará por un lado, un procedimiento para encontrar el *modo* de satisfacer estas necesidades: una heurística. Esto implica que al concebir la innovación, aunque ésta aún no se haya realizado ni siquiera en un prototipo, el diseñador ya comienza a acumula conocimiento sobre las *formas* en las que puede generar innovaciones (presentes y futuras), comienza entonces a generar capacidades tecnológicas. Además, y si es el caso, al encontrar una posible ruta de solución particular al problema de satisfacción de la necesidad identificada, esta selección implica que existe potencialmente un conocimiento útil para explorar una solución para ese problema concreto, pero también,

existe un conocimiento inútil que no puede ser aplicado particularmente a ese problema pero, que potencialmente puede ser usado para la solución de otro. En resumen, desde esta primera fase, comienza a observarse un fenómeno complejo que se resuelve por desagregación (análisis) y selección.

1.1.2. El diseño

A partir de que se identifican las necesidades se define un problema a resolver, el agente que genere las innovaciones, comienza con un proceso de diseño el cual consta de una serie de procedimientos de sistematización de los conocimientos previos y/o la generación simultanea de nuevos que permiten presentar posibles opciones para resolver el problema. Es decir, el proceso de diseño, no es otra cosa más que la recombinación de conocimientos o la incorporación de nuevos con el objetivo de generar un nuevo bien, servicio, proceso o técnica que se espera satisfaga, no solo las necesidades previamente identificadas, sino que además cumpla con condiciones que le dan factibilidad económica (Ulrich y Eppinger, 2000).

Este proceso de diseño puede ser más o menos eficiente dependiendo de un amplio conjunto de factores, entre ellos, las habilidades del diseñador o diseñadores para aprovechar las capacidades con las que cuenta dentro del espacio donde se genera la innovación (la empresa o el centro de investigación, por ejemplo) para encontrar las soluciones más convenientes; su capacidad de previsión tecnológica sobre el producto o proceso que desea crear; la división de tareas para el diseño que está en función de la propia naturaleza de la invención (Baldwin y Clark, 2000); el conjunto de incentivos necesarios para cooperar en la búsqueda de las mejores opciones de diseño, entre otras.

1.1.3. La investigación.

Este proceso de diseño puede o no contener una serie de actividades de investigación necesarias para generar una invención. Esto es, en el proceso de diseño la recombinación de conocimientos no puede ser suficiente para poder generar la innovación, por el contrario puede requerir de conocimientos nuevos que pueden ser adquiridos de distintas fuentes: centros de investigación y desarrollo propios de las empresas, centros de investigación externos (universidades y centros de investigación),

proveedores, usuarios, etc. Cualquiera que sea la fuente de la adquisición de estos nuevos conocimientos (desde el punto de vista del diseñador), implica un proceso de investigación ya sea en el rastreo del conocimiento o en la generación del mismo. En este paso, la investigación se refiere al desarrollo de tareas propias de exploración de los insumos técnicos y de conocimientos necesarios para generar el producto y por lo general, la investigación es realizada por individuos que pertenecen a redes de conocimiento especializadas. Dicha investigación es del tipo aplicada, sin embargo, también se requieren de insumos propios de la investigación básica.

Las investigaciones que se realizan trascienden a la fase del desarrollo del producto que no es otra cosa que la materialización (si se trata de un bien físico) o las primeras aplicaciones experimentales (si se trata de un servicio) de la invención (Ulrich y Eppinger, 2000). En esta fase, se realizan los posibles ajustes del bien y se evalúan los costos y riesgos inherentes a la invención. Ahí, se realizan pruebas sobre la factibilidad de que el nuevo producto tenga éxito entre los posibles consumidores, tanto en su carácter técnico como económico. Este último paso es clave, puesto que determina si el nuevo producto puede convertirse o no en una innovación, es decir, que satisfaga las necesidades parciales o totales (o incluso otras no previstas) para el que fue diseñado y usado por otros agentes.[2]

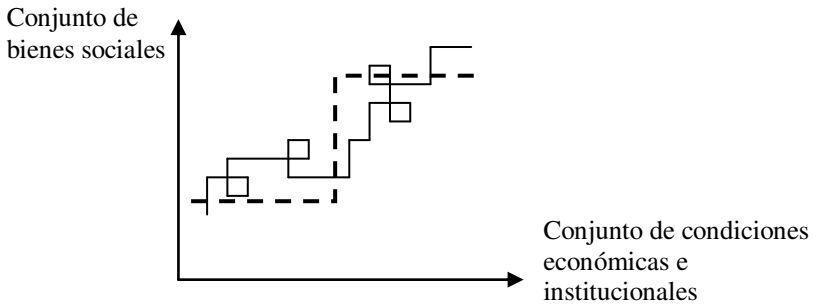
1.1.4. La innovación.

Para que la invención se convierta en innovación se requiere que se cumplan algunas condiciones económicas e institucionales. El carácter de estas condiciones está en función del ambiente social en el que se encuentre el nuevo producto. Sin embargo, el surgimiento de innovaciones genera cambios en estos ambientes sociales de tal forma que también afecta las condiciones económicas e institucionales. Freeman (1979) presenta un ejemplo ilustrativo y paradigmático de este fenómeno con los límites de velocidad de los automóviles. Cuando surgen los primeros automóviles de consumo

[2] Hay un consenso de que la diferencia fundamental entre la invención y la innovación es que la primera es un nuevo bien que satisface una necesidad, mientras que la segunda, cumple con la misma condición pero además, se comercializa o entra a algún mercado. Esto naturalmente es cierto para las economías capitalistas de mercado, sin embargo, las innovaciones pueden incluso manifestarse bajo lógicas distintas a las del mercado, por ejemplo, los de carácter militar, de seguridad nacional, de prioridades como en el caso de pandemias y los casos en que por la propia naturaleza de bien pueda ser sujetos de fallas de mercado (externalidades, rendimientos crecientes o problemas de información).

masivo existen condiciones económicas e institucionales que lo permiten (mercados que satisfacen la oferta e incentivos institucionales para generarlos –*New Deal*), los automóviles rebasaron técnicamente los límites de velocidad que estaban permitidos de tal forma que en lugar de reducir la capacidad de los mismos se permitieron velocidades más altas (lo cual significaba que los factores y productos podrían reproducirse más rápido), ello generó cambio en las estructuras técnicas de los autos (con motores más revolucionados era necesario generar nuevos sistemas de frenos, por ejemplo) y en la infraestructura de los países (desde la pavimentación hasta la creación de largas autopistas, por ejemplo). De tal modo que las innovaciones surgen en ambientes sociales específicos, pero a su vez estás afectan a dichos ambientes, de tal forma que puedan reforzar o no el proceso de innovación subsiguiente.[3] Así, la relación entre el surgimiento de innovaciones y los cambios económicos e institucionales es un proceso recursivo no lineal y creciente compuesto por una gran cantidad de variables interrelacionadas de modo múltiple y no-unívoco, que configuran al proceso de modo complejo observando cambios significativos por plazos (equilibrio punteado). Una posible representación de este fenómeno es el siguiente:

Fig. 2. Interacción entre la innovación tecnológica y las condiciones económicas e institucionales



Las innovaciones pueden representarse como el incremento en el conjunto de los bienes sociales (mayor diversidad en el muy corto plazo), que en el gráfico se representa como una línea vertical ascendente, ello repercutirá en la condiciones económicas e institucionales (por ejemplo, en la creación de un nuevo mercado o una regulación

[3] Esto se refiere a la idea original de Schumpeter (1968) de que las innovaciones se dan por racimos, es decir, una innovación trae consigo, por lo general, otras innovaciones en una especie de efecto multiplicador.

vinculada con la innovación) una línea horizontal hacia la derecha. Estas condiciones pueden generar la sustitución en el consumo de algún producto (herraduras por llantas, por ejemplo) de tal modo que la diversidad de bienes sociales puede reducirse de nuevo en el muy corto plazo, sin embargo ello crea condiciones distintas para generar nuevos productos (por ejemplo, eliminación de regulaciones que reduce el conjunto de condiciones económicas e institucionales). Estos cambios pueden tener distintos sentidos y magnitudes pero es claro que existe una trayectoria de dependencia que hace que se evolucione según las condiciones anteriores inmediatas al cambio, así como el eco que dejan las condiciones antecesoras (*path dependence*). Por otro lado, la evolución de las economías capitalistas de por lo menos el último siglo, presenta evidencia de que la diversidad de productos se ha incrementado (surgimiento sistemático de innovaciones) y que el entretejido de las condiciones económicas e institucionales se ha vuelto mucho más complejo, de tal modo que la tendencia general que ilustra el gráfico es hacía arriba y a la derecha, considerando al origen del gráfico como pocos bienes y condiciones económicas e institucionales relativamente simples. Así, la línea punteada representa la tendencia general propio de un proceso que cambia por saltos. Cabe señalar que el hecho de que haya retrocesos hacia abajo o a la izquierda, no significa que exista reversibilidad sino solamente, que en el propio proceso de innovación perecen bienes e instituciones lo cual reduce la cantidad de los conjuntos en el muy corto plazo.

En resumen, las innovaciones son propias de un ambiente social (económico e institucional) que las crea y las acepta. Estas mismas innovaciones alteran al propio ambiente creando nuevas condiciones que posibilitan futuras innovaciones.

1.1.5. La difusión.

Las innovaciones se presentan entonces, desde el punto de vista de quien la genera, como la oportunidad de *explotar* el esfuerzo realizado. Ello crea incentivos para que por un lado, el nuevo producto sea difundido para su consumo, lo cual en una economía de mercado significaría ganancias para el innovador. Pero por otro lado, la reproducción de la innovación (con o sin mejoras) por parte de otros productores que aprovechan la innovación esperando obtener ganancias propias acelera el proceso de

difusión del nuevo producto. Así, la difusión suele tener una fase inicial lenta (asociada a las ganancias del innovador), pero si es exitosa, puede entrar en una fase de difusión exponencial (asociada a las ganancias de los replicadores de la innovación) hasta que se estabiliza el uso del producto en forma de bien estandarizado (*commodity*).

La difusión puede generar dos efectos para la generación de otras innovaciones. En el primero, la innovación puede reforzarse de tal modo que emerjan otros productos relacionadas con ella, convirtiéndola en un diseño dominante (por ejemplo, el formato de video VHS sobre el Beta o el teclado QWERTY) generado por los rendimientos crecientes por la adopción (David, 1985), esto es, en la competencia tecnológica, si una tecnología se impone sobre otra, no necesariamente porque sea la mejor en todos los sentidos, sino por el hecho de que una parte significativa del mercado (dada la incertidumbre inicial que incorpora) la adopta, se generan rendimientos creciente por la adopción que se manifiestan por el aprendizaje de su uso (*learning by doing*), externalidades de redes (*network externalities*), economías a escala en la producción, rendimientos crecientes de información, e interrelación tecnológica (interfaces). Así, el surgimiento de una tecnología puede generar la emergencia de otras de tal modo que se refuerzan así mismas. El segundo efecto es más simple, y tiene que ver con el hecho de que en la difusión de las innovaciones se generan otras incrementales sobre la original de tal modo que se diversifica el mercado.

En este esquema básico de innovación se puede observar que existen en todos los pasos una interacción tanto técnica como económica en un marco general de incertidumbre, sin embargo, parece claro que el peso en la fase de invención recae en la parte técnica, mientras que en la fase de innovación recae en la económica. Aunque en los procesos de innovación se pueden distinguir esquemáticamente cada una de estos pasos, las fronteras entre cada uno de ellos no necesariamente están perfectamente definidas y mucho menos presentan una secuencia lineal contundente. El esquema es sólo una ficción analítica para distinguir distintos conjuntos de problemas concurrentes con el proceso de innovación. De hecho, algunos de los pasos presentan interacciones con otros que los retroalimentan, por ejemplo, puede lanzarse al mercado un nuevo producto que haya pasado por la fase de prueba y a partir de la interacción con los clientes puede incluso rediseñarse completamente.

En resumen, la innovación tecnológica podría parecer por un lado, como un proceso no intencional que emerge a partir del constante aprendizaje en la producción, resolviendo pequeños problemas corrientes de múltiple naturaleza y que por lo general se traducen en innovaciones incrementales. Por otro lado, la innovación puede ser un proceso planeado que contiene al menos alguna de las fases presentadas arriba. Es decir, es un transcurso intencional que pretende incrementar el valor de un producto o proceso y es bajo este esquema que se gestan, por lo general, las innovaciones más significativas: las radicales.

Los temas incluidos es el esquema básico de la innovación han sido estudiados desde distintos enfoques, mismos que analizan en mayor o menor medida los distintos tópicos. Sin embargo, a pesar de que los enfoques puede dar luz sobre la relevancia y las relaciones causales de los elementos contenidos en la innovación tecnológica, no existe un cuerpo teórico consistentemente articulado que utilice un mismo lenguaje y que presente claramente las relaciones entre los distintos temas de la innovación. Y esto es principalmente por tres razones: a) el análisis de la innovación tecnológica es relativamente joven, a pesar de los estudios pioneros de Schumpeter en la segunda y tercera década del siglo pasado, las investigaciones sobre la innovación tecnológica tiene apenas unas cuatro décadas, es por lo tanto, un programa en construcción; b) las herramientas y supuestos del análisis ortodoxo (*main stream*) de la economía no son compatibles con los resultados de los estudiosos de la innovación, por lo tanto, es en realidad una comunidad científica pequeña que trabaja a contracorriente y; c) las principales aportaciones del análisis de la innovación se sustentan a partir de un esquema inductivo, principalmente por análisis empíricos o estudios de caso, lo que, sin restar validez científica, han repercutido tanto en una lenta construcción de una teoría general, como en una escasa formalización de la misma, con las ventajas y desventajas que ello significa. Por estos motivos, el cuerpo teórico del análisis de la innovación tecnológica ha tenido distintos enfoques que si bien son pertinentes parecen aislados y por momentos incluso contradictorios. En la siguiente sección presentaré brevemente algunas de las ideas centrales de los principales enfoques.

1.2. LOS ENFOQUES DE LA INNOVACIÓN Y SU DESARTICULACIÓN.

Para efectos de ordenar los distintos enfoques de la innovación tecnológica, los presentaré por medio de la tradicional forma de desagregación de la teoría económica, esto es, a niveles micro, meso y macroeconómicos.

1.2.1. Perspectiva micro.

El nivel en que principalmente se desarrollan los estudios de la innovación es el microeconómico y esto se debe a que es en la empresa donde emergen principalmente las innovaciones. Los estudios pioneros de Schumpeter (1968) proponen la idea de que las innovaciones surgen en las empresas a partir de la interacción de fuerzas económicas evolutivas que desembocan en innovaciones. Schumpeter inicialmente presentaba la idea de que las innovaciones surgen por la habilidad de un individuo para concebir, desarrollar y comercializar nuevos bienes o procesos: el célebre innovador schumpeteriano, sin embargo, después observó que en realidad las innovaciones surgían en el ambiente de la burocracia empresarial, en las organizaciones. Esta aportación de Schumpeter concentró el debate en torno a las características que debería tener la empresa para realizar sus actividades de innovación. Una de las características necesarias para la innovación que presentaba Schumpeter era que dichas empresas requerían de ganancias extraordinarias para poder financiar sus investigaciones, de tal modo que en una economía capitalista, la posibilidad de generar innovaciones estaba en función, según el autor, de la estructura de mercado en la que se encontrara la empresa innovadora, en particular, en una estructura oligopólica. Esto evidentemente es contrario a la idea fundamental de la teoría neoclásica de que el equilibrio económico (satisfacción de todos los agentes y uso eficiente de los recursos) sólo se encuentra en una estructura de competencia perfecta. En resumen, Schumpeter pone a discusión dos elementos centrales de la innovación:

1) Las características internas que deben tener la empresas para generar innovaciones; y
2) Las estructuras de mercado en las que deben de estar contenidas.

Esta primera idea la desarrollaré enseguida y la segunda pertenece al conjunto del análisis mesoeconómico.

El primer enfoque que ha sido estudiado es precisamente este que tiene que ver con las características de las empresas. El carácter innovador de las organizaciones ha sido estudiado ampliamente (Penrose, 1959, Teece, 1994, Teece, *et. al.* 1994). En estos estudios se presentan dos elementos centrales. Por un lado, la generación de una actitud innovadora por parte de las empresas está en función de los incentivos con los que cuenta para hacerlo así como de la estructura organizacional que constituye a cada empresa. Y por otro lado, la capacidad estratégica que tengan los administradores de las empresas para promover las innovaciones.

En paralelo a este enfoque y desde que Freeman (1979) define a la tecnología esencialmente como conocimiento y que es éste la principal palanca para la generación de innovaciones, se ha desarrollado otro enfoque sobre el tema de la acumulación y generación de conocimiento (aprendizaje), a partir de siguiente silogismo simple:

1) La innovación depende del desarrollo tecnológico,
2) La tecnología es esencialmente conocimiento,
3) El aprendizaje es la acumulación y creación de conocimiento, entonces
4) El aprendizaje es el elemento central para la innovación

Así, a partir de que Arrow (1962) muestra que el aprendizaje de las empresas –principales unidades de generación de innovaciones- se encuentra más allá de la simple capacitación técnica y que las mismas aprenden por el propio ejercicio de la producción (*learning by doing*), se ha creado una corriente de estudio al respecto que cuenta ya con todo un menú de aprendizajes, entre ellos: aprendizaje por la interacción (*learning-by-interacting),* aprendizaje en la operación *(learning-by-operating),* aprendizaje debido al cambio *(learning from changing),* aprendizaje por la retroalimentación del sistema de desempeño *(system performance feedback),* aprendizaje por capacitación, *(learning through training),* aprendizaje por contratación, (*learning-by-hiring),* aprendizaje por medio de la búsqueda (l*earning-by-searching),* aprendizaje en la producción (*learning-by-producing),* y aprendizaje por la exploración *(learning-by-exploring)*. (Bell, 1984, Cohen, 1989, Malerba, 1992, Dodgson, 1993).

Uno de los principales enfoques desarrollados a partir del aprendizaje es el de la relación proveedor-usuario (Lundvall, 1992). Esta relación puede tener dos direcciones desde el punto de vista de las empresas, por un lado, lo que puede aprender la empresa como usuario de los bienes y servicios de sus proveedores y por el otro, lo que puede

aprender a partir de sus consumidores. De la primera relación, puede aprender desde elementos técnicos hasta heurísticas y de la segunda relación nuevas aplicaciones de sus productos e identificar otras necesidades. Ello implica necesariamente que para que una empresa sea innovadora las funciones que realizan los distintos departamentos estén lo suficientemente integrados para aprovechar este aprendizaje. Ello pone a debate las formas organizativas de la producción, es decir, que es más conveniente un sistema modular que reduzca costos y promueva la diversidad de los productos o uno integral que pueda aprovechar las ventajas de la relación proveedor usuario aunque este sea más costoso y lento.

Otro enfoque que se desarrolló con base en la literatura de los tipos de aprendizajes (*learnings*) es el de las capacidades (Cohen, 1990, Lall, 1993, Bell, 1995). Esto es, en el proceso de aprendizaje las empresas crean capacidades (reglas y procedimientos para resolver problemas tipo recurrentes o proactivos) que son clave para la innovación. Entre las distintas capacidades que pueden adquirir las empresas se encuentran las de absorción tecnológica, las tecnológicas, las organizacionales y las empresariales.

Por otro lado, esta relación de proveedor usuario así como el del desarrollo de los modelos *bottom up*, han generado un enfoque basado en redes. De tal modo que las innovaciones son el resultado de las interacciones de los distintos agentes que participan en el proceso, por lo tanto desde esta perspectiva la innovación está en función de la cantidad de agentes que participan en el sistema, el tipo de agentes de los que se trate, las cantidad de relaciones que tengan cada uno de los agentes, el tipo de relación que tengan cada uno, los flujos de comunicación, el tipo de comunicación que establezcan y las relaciones que tengan los agentes con otros agentes distintos a los del sistema (externos).

Un enfoque que se desprende del anterior y que está contenido dentro del estudio de la empresa como agente central de la innovación tecnológica es la espiral de Nonaka y Takeuchi (Nonaka, 1995). Este enfoque presenta que las innovaciones se generan a partir de interacción de los agentes en un proceso recursivo y sistemático de comparto de conocimiento. Los agentes tienen un conocimiento tácito y por medio de las interacciones con otros, lo explicitan hasta convertirlo en un conocimiento codificado.

Otro enfoque de carácter microeconómico es el presentado por Nelson y Winter (Nelson, 1982). En este caso, las innovaciones son generadas en la vecindad de los bienes que produce y el factor clave son por un lado, las habilidades de los agentes y por el otro, las rutinas que se generan al interior de las firmas.

Finalmente, se puede presentar un último enfoque que es el institucional (Milgrom y Roberts, 1992), en este caso, reconoce los consensos generales de la teoría de la innovación pero pone énfasis en los problemas de coordinación ya sea por las fallas de los mercados o por la existencia de riesgo moral (*moral hazard*) y selección adversa. El esquema de contratos y las legislaciones son las herramientas que posibilitan la solución de estos problemas.

1.2.2. Perspectiva meso.

Desde que Schumpeter presentó la idea de que es necesario tener estructuras de mercado oligopólicas para financiar la innovación y hacer frente a los riesgos que tiene implícita, se han desarrollado muchos estudios sobre la relación que tienen las estructuras de mercado y la innovación tecnológica, por citar a algunos se encuentran los textos de Bain (1962) o Tirole (1988) desde el enfoque de la Teoría de la Organización Industrial; el trabajo de Williamson (1991) desde la perspectiva institucional y; los estudios de Teece (1996) o Zoltan, (1987) desde la perspectiva evolutiva. En general se estudian las estructuras de mercado (desde competencia perfecta hasta monopolio puro) y su relación con la innovación a partir de ciertas categorías: financiamiento, diversificación de mercados, barrera de entrada y salida, poder de mercado, y estructuras de consumo.

Este tipo de estudios, ha desembocado en otros enfoques que tiene que ver con el carácter sectorial o territorial de las innovaciones. Los estudios sectoriales (Pavitt, 1984) determinan que en las economías hay sectores (industrias) que tienen un mayor peso tanto en el dinamismo innovador como en el efecto que se desprende sobre el resto de los sectores, esto se debe a dos razones principales: a) la economía es un sistema de interrelaciones productivas divididas en sectores que tienen características diversas, y dado esto, b) hay una jerarquía sectorial a partir de la cual, un subconjunto de sectores determinan el ritmo de transmisión del efecto de las innovaciones. De tal modo que se pueden concebir sectores básicos y secundarios a partir de un criterio tecnológico. Por

otro lado, hay una literatura sobre el efecto que tiene el territorio frente a la innovación (Hageman, 1999). Esto es, la innovación tecnológica se genera en espacios territoriales específicos que combinan recursos naturales, infraestructura, sistemas financieros y empresas de base tecnológica y en la interacción de cada uno de estos factores se promueven las innovaciones tecnológicas.

Un tercer enfoque vinculado con el nivel meso, es la llamada triple hélice de Etzkowitz (1997) en la que se explica que las innovaciones son el resultados de la interacción que se determina entre las empresas, las universidades y los centro de investigación y el gobierno. Para que se logre la innovación se requiere el cumplimiento de dos condiciones: a) una convergencia de intereses entre estos tres agentes y b) un lenguaje (código) común que permita que las interacciones materializadas en convenios, acuerdos o políticas redunden en la generación de innovaciones.

1.2.3. Perspectiva macro

Cuatro son los enfoques que se pueden presentar a este nivel. El primero es el de los paradigmas tecnológicos propuesto por Pérez (2002), el segundo el enfoque del sistema nacional de innovación (Dosi, G. *et. al.*, 1988) y el tercero, el del efecto del comercio internacional sobre la innovación local y por último el del proceso de *catchig-up.* (Cimoli, 2000)

En el primer caso, se explica que las innovaciones están contenidas en amplios paradigmas tecnológicos que determinan todo el proceso social. Ello tiene implicaciones tanto en el capital físico como en el financiero de los países. Los paradigmas tecnológicos son similares en duración a los ciclos de Kontratieff y se gestan al inicio de forma lenta, después tienen un amplio y rápido dominio, hasta que finalmente se agotan y le dan paso a uno nuevo.

El enfoque del sistema nacional de innovación se refiere a las interacciones entre los agentes más agregados que participan en la innovación (estado, empresas, universidades, centros de investigación, y sistema financiero). Esta perspectiva implica que puesto que cada país es diferente, los sistemas también lo son, lo cual implica la ausencia de recetas generales para la generación de innovaciones.

Por otro lado, el efecto del comercio sobre las innovaciones va en dos sentidos opuestos, por un lado, se favorece la innovación por medio de la transferencia

tecnológica que se puede generar gracias al comercio (Vernon, 1979), pero por otro lado, si no se hace con cuidado puede afectar sectores clave que acaben con las capacidades tecnológicas de los países. La regulación comercial y las distintas herramientas de política comercial se convierten por lo tanto en instrumentos de política de innovación.

Por último, el enfoque de *catching-up* (Cimoli, 2000) implica que los países menos desarrollados pueden alcanzar a los países desarrollados por medio de distintos instrumentos: acuerdos de cooperación, ingeniería de reversa, formación de capital humano en los países desarrollados, comercio y reproducción de esquemas exitosos. La perspectiva implica comenzar las innovaciones desde productos relativamente maduros pero importantes en el sentido tecnológico e ir incrementando las capacidades nacionales.

En resumen, la innovación tecnológica surge principalmente en las empresas con ciertas características: convicción innovadora; incentivos para innovar; una administración impulsora de la innovación; una estructura adecuada para innovar propensa al aprendizaje de diversas fuentes; con una relación proveedor-usuario fluida; que genere e incremente sus capacidades tecnológicas; que participe en redes de innovación; en la que internamente haya un flujo rápido de conocimientos; procedimientos lo suficientemente flexibles para poder innovar; y esquemas contractuales convenientes para estimular la cooperación tendiente a la innovación. Sin embargo, el que las empresas cuenten con algunas o todas de estas características no garantiza que se gesten automáticamente las innovaciones, puesto que cada empresa actúa en un ambiente particular determinado por la estructura de mercado en la que se encuentra, el sector al que pertenece, el territorio en el que se desempeña y la relación que mantiene con otros agentes agregados (gobiernos, universidades, etc.). Pero además, está determinado por el papel que desempeña en el paradigma tecnológico vigente, las oportunidades o límites que le impone tanto la estructura del sistema nacional de innovación, el comercio internacional y las características económicas del país en el que se encuentra.

Como puede observarse, cada una de estas condiciones requeridas para favorecer a la innovación tecnológica, son ciertas y además esto es lo que podría resumir como el cuerpo teórico principal de los estudiosos de la innovación. Naturalmente, detrás de

cada estudio hay evidencia, un análisis detallado de sus argumentos, y metodologías propias. Sin embargo, hay algunos problemas.

1.2.4. La complejidad del cuerpo teórico de la innovación tecnológica y su desarticulación.

El proceso de innovación es complejo e incierto. Complejo porque son muchas las variables que, como se puede observar arriba, entran en juego para generar un proceso innovador en cualquiera de su formas. Y si partimos de tres supuestos: a) que en una economía de mercado es la empresa el catalizador del proceso de innovación (quien regula las demandas del mercado -*demand pull*- y las posibilidades de ofrecer nuevos productos, procesos, sistemas, etc. con base en el conocimiento previo recombinado o nuevo -*tecnology push*-); además, si b) estas empresas son entidades o cuerpos sociales formados por individuos con intereses, experiencias y capacidades distintas, resulta que cada empresa es en consecuencia un meta-agente único; y si c) las empresas se encuentran en ambientes externos con los que mantienen diversas relaciones en distintas magnitudes. Entonces, el proceso de innovación (*i.e.* nacional, industrial o el de una empresa) se vuelve extremadamente complejo.

Esta complejidad se incrementa por el propio proceso de generación de conocimientos e innovaciones y los elementos que participan en ello (nuestra colección de *learnings*, las relaciones entre los agentes internos a la empresa, la participación de agentes externos a las empresas – por ejemplo las universidades- los tipos de conocimiento, las estructuras y estrategias de las empresas, etc.). De tal modo, que el proceso ya no solamente es complejo, sino además, incierto puesto que en la interacción de todos estos elementos no es posible determinar los resultados concretos.

Un último elemento que es pertinente mencionar y que vuelve aún más complejo el análisis de la innovación tecnológica es el de la hipótesis de la incomensurabilidad de algunos elementos propios del proceso de innovación tecnológica, pues en él existen componentes que difícilmente pueden ser aislados y mesurables, por ejemplo, cómo medimos el conocimiento tácito o el incremento de las redes informales internas de una empresa. Esto difícilmente lo podremos hacer, sin embargo, existen y son determinantes.

Esta complejidad se refleja en el estudio de la innovación y la diferencia de enfoques no sólo se manifiesta en los temas, acentos y metodologías que desarrollan, sino también en el fondo puede haber diferencias significativas sobre las relaciones de los elementos significativos para la innovación, lo cual, en cierto sentido los pueden volver contrarios. Hay varios ejemplos de esta desarticulación y solo presentaré algunos en los distintos niveles y enfoques para ilustrar la idea.

El primero es que hay un reconocimiento del Schumpeter I y del Schumpeter II, diferenciado porque en el primero se pone énfasis en el carácter innovador de una persona (el innovador shumpeteriano) mientras que en el segundo, centra su atención en la organización empresarial (burocracia), si bien el propio Schumpeter reconoce este hecho y desde entonces la atención se ha enfocado en la empresas aún no se resuelve el tema del individuo como agente innovador, porque si bien es claro que éste requiere de un ambiente favorable para realizar su actividad aún sigue siendo el ser humano el generador de las soluciones intrínsecas al problema particular que genera la innovación.

El siguiente ejemplo es el de la cortina de humo que genera la gran cantidad de tipos de aprendizaje, puesto que si bien estos dan respuesta sobre las distintas formas de acumular conocimiento adecuado para la innovación, dejan de lado una explicación pura del aprendizaje (en singular) que para términos de la construcción de una teoría general de la innovación es fundamental.

Otro ejemplo, ahora más concreto, es la inconsistencia entre la espiral de Nonaka (1995) y las aportaciones del nuevo institucionalismo, esto es, en la espiral se pasa de un conocimiento tácito a uno explícito por medio de un proceso de socialización, sin embargo, en este proceso se presenta incertidumbre y posibilidad de oportunismo por parte del agente poseedor de conocimiento tácito, entonces tanto las condiciones organizacionales como la estructura de incentivos deberían de estar alineadas para que resulte el modelo, sin embargo, la solución solo es parcial dejando en consecuencia un área gris que no ha sido resuelta. Esto mismo se puede decir de la triple hélice (Etzkowitz, 1997) puesto que no hay incentivos endógenos para que se coordinen las universidades y el gobierno con las empresas.

Un ejemplo más es el referente al tema de las rutinas (Nelson, 1982) frente a sectores con base en tecnología (Pavitt, 1984), esto es, las rutinas se consideran como los genes de un bien, durante el aprendizaje, cambia una parte de la rutina (cambia el

gen) referida a una acción, proceso o incluso línea de producción, sin embargo, en los sectores basados en conocimiento las acciones, procesos o líneas son dinámicas y por definición no-rutinarias, este tipo de contradicciones por lo general se pasan por alto.

Un último ejemplo, tiene que ver con la oposición en el tipo de recetas que se prescribe, es la diferencia entre la propuesta de los tecnoparadigmas (Pérez, 2002) y el *catching-up* (Cimoli, 2000) puesto que mientras que en el primero se sugiere que se promuevan empresas para sectores nacientes de un posible tecnoparadígma, de tal forma se obtengan todas las ventajas del mismo, en segundo caso la recomendación es promover en empresas de productos medianamente maduros para aprovechar la experiencia de las empresas externas.

Todos estos ejemplos, y otros más que se pueden citar, ilustran la desarticulación de la teoría de la innovación, dicha desarticulación se presenta en forma de huecos (temas no resueltos), complementariedades olvidadas o incluso contradicciones. Así, una posible forma de resolver esto (aunque no la única) es integrar el cuerpo teórico por medio de algún tipo de formalización.

De esta manera cabe preguntarse si es posible encontrar un modelo consistente que abstraiga los elementos verosímiles de los distintos enfoques y que permita integrar a todo el cuerpo de conocimientos sobre la innovación tecnológica. Personalmente, creo que en los sistemas complejos adaptables (SCA) podremos encontrar una respuesta de este tipo. En todos los modelos se observa a la innovación tecnológica como un sistema y además en prácticamente todas las lecturas se resaltan los elementos de complejidad e incertidumbre del proceso de cambio tecnológico que son características fundamentales de los SCA. Quizá esta corriente de análisis nos pueda dar luz para resolver este problema.

CAPÍTULO 2. LOS SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTABLES

INTRODUCCIÓN.

El análisis de los sistemas complejos y su aplicación en distintas ciencias desde la biología o física hasta la informática no es nuevo y naturalmente también ha sido retomado en la ciencia económica y la administración. H. Simon es un pionero en el desarrollo y aplicación de este programa de investigación, incluso antes de la denominación de esta corriente de estudio y sentó algunos principios para concebir a la empresa y a la economía en general como un sistema de este tipo.

Por otro lado, J. Holland es uno de los estudiosos que han presentado con mayor claridad el programa de investigación de esta corriente y ha logrado abstraer los elementos esenciales para poder definir al sistema complejo adaptable, así como tender las similitudes entre distintos sistemas y puntualizar procesos que dan acercamientos para entender, desde una perspectiva evolucionista y de adaptación, la dinámica de este tipo de sistemas.

En una ruta paralela y desde mi perspectiva complementaria a la de Holland, S. Kauffman ha desarrollado con base en un modelo de redes relativamente simple, un esquema de análisis para medir el grado complejidad de un sistema y el cambio que sufre un agente a partir de las oportunidades e incentivos que se encuentran en su vecindad, este modelo, como se verá más adelante puede resultar útil para el análisis tanto de la intensidad de la relaciones que se gestan entre los componentes relevantes en el diseño o producción de un modelo, como los espacios limitados de innovación que estructuralmente se encuentran en el proceso.

Finalmente, un cuerpo de análisis más amplio y general, y que es uno de los insumos metodológicos más relevantes en el estudio de Kauffman, es el de la teoría de redes, el cuál con un nivel de abstracción más alto permite para nuestra investigación explicar las reglas de relación entre los diversos agentes que participan del proceso de innovación tecnológica.

Así, cabe preguntarse si estos cuatro cuerpos de análisis pueden contribuir en conjunto para formar una estructura metodológica que permita enlazar las distintas perspectivas de análisis de la innovación tecnológica. En el presente capítulo se detallarán algunos de los elementos centrales de estas aportaciones en este sentido.

Desde luego, en este estudio no se abordan todos los temas vinculados con la teoría de la innovación tecnológica pero, se espera demostrar que es posible aplicar esta metodología a todo el análisis de la innovación.

2.1 LAS APORTACIONES DE H. SIMON.

Las aportaciones de Simon al pensamiento económico y administrativo se han convertido en todo un programa de investigación desarrollado por décadas. Para efectos de este ensayo, solo presentaré tres de sus aportaciones más importantes, a saber, la noción de racionalidad limitada y división del conocimiento; el efecto que tiene esto sobre las organizaciones; y el planteamiento básico de los sistemas complejos (sistemas jerárquicos).

Simon realizó distintos trabajos experimentales en los que justificó la idea fundamental de que la capacidad de cálculo de los individuos es limitada y por lo tanto, la racionalidad también lo es (Simon, 1991). De tal forma que la acciones humanas se basan primordialmente en modelos mentales (manipulación simbólica) de la realidad por medio de instrumentos mentales como la memoria, la categorización, el juicio, la resolución de problemas y la inducción y la heurística. Así, explica como la noción de la resolución de problemas pasa del plano de una actividad individual a la noción de una resolución de problema organizacional con un claro reconocimiento de un proceso evolutivo de adaptación y aprendizaje organizacional de las corporaciones. La consideración de esta perspectiva induce a considerar la división del trabajo como una actividad de resolución de problemas y la recursiva división de problemas en sub-problemas consistente con la noción del propio Simon de la jerarquía de sistemas.

En opinión de Egidi y Marengo (2004), el desarrollo de una teoría profunda de la resolución de problemas se vuelve crucial para la explicación de las rutinas y procedimientos de las firmas y su evolución.

La idea de la división del conocimiento y la jerarquía de sistemas es una de las ideas principales de Simon. En Las Ciencias de lo Artificial (Simon, 1973) introduce la propuesta de que todos los sistemas posibles sean físicos, sociales, biológicos o artificiales comparten la propiedad de tener una arquitectura de descomposición cercana (*near decomposable architecture*), es decir, están organizados en capas jerárquicas de

partes, partes de partes, partes de partes de partes, etc. Así, las interacciones sobre los elementos pertenecientes al conjunto de las mismas partes son mucho más intensas que las interacciones entre elementos pertenecientes a otras partes. Por intenso debe entenderse que la conducta de un componente depende más cerca de la conducta de otro componente perteneciente a la misma parte que a la conducta de un componente perteneciente a otra parte[4].

Este tipo de arquitectura puede ser encontrado en las firmas, donde la división del trabajo, la constitución de departamentos y la descomposición jerárquica de tareas son todos elementos que definen un sistema de descomposición cercana. Esta hipótesis de descomposición cercana ha sido utilizada para modelar los sistemas de producción, diseño y consumo modular (Baldwin, C. J. y K. Clark, 2000; Frenken, 2000; Dosi, G., Hobday, M., Marengo, L.y Prencipe A., 2002)

Por otro lado, en términos económicos, esta arquitectura -esbozada y detallado durante décadas por Simon- ha sido estudiada particularmente en la literatura de los costos de transacción, originalmente por Williamson (1975) y sintetizada por Migrom y Roberts (1993). La explicación de los costos de transacción reivindica que los procesos de descomposición de las actividades económicas están limitados por la capacidad de los mecanismos de coordinación mismos que pueden regular eficientemente a las subunidades del sistema. En la economía real es usual creer que los mercados competitivos constituyen estos mecanismos así, la teoría de los costos de transacción observa que, bajo algunas circunstancias, los mercados no alcanzan la eficiencia completa.

Así, en el trabajo de Simon se puede encontrar una relación consistente con tres elementos fundamentales. Por un lado, las limitaciones de cálculo individual de las personas generan un racionalidad limitada, esto provoca en consecuencia que la resolución de problemas complejos (entendidos como un conjunto de elementos ordenados sistemáticamente en formas no lineales, es decir, donde el total del problema es mayor que la suma de sus partes) requiera de la división del trabajo dentro de una

[4] En términos biológicos se dice que existe una relación epistática mayor en la vecindad. La epistasia o epístasis se define como la interacción génica entre diferentes genes para una determinada característica. Así, se utiliza la metáfora para referirse al hecho de que los componentes tienen mayor interacción (interfaces y dependencias) con los componentes que en conjunto crean una función del artefacto que con los componentes que cumplen con otra función.

organización, la cual puede entenderse igualmente como el ordenamiento de un sistema jerárquico. En otras palabras, sienta las bases para explicar la relación entre condiciones técnicas (solución de problemas) y estructuras organizacionales. Más adelante se plantearan precisiones al respecto.

2.2. LAS APORTACIONES DE J. HOLLAND.

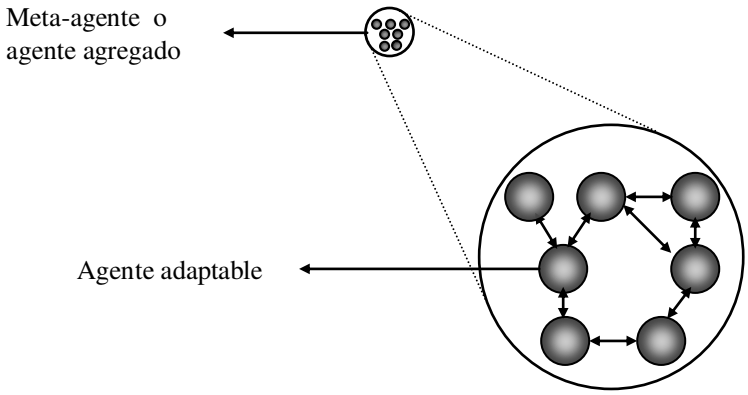
El estudio de la complejidad como el propio Simon (1973) lo demostró, no es exclusivo de los problemas sociales o humanos, se encuentra prácticamente en todas las esferas de la realidad. Los sistemas son ubicuos y algunos de ellos son complejos y además tienen el carácter de modificarse bajo las reglas de la adaptación. A este tipo de sistemas es a los que se refería Simon en sus trabajos.

Uno de los principales estudiosos de los sistemas complejos adaptables (SCA), es J. Hollan el padre del algoritmo genético (1975). Holland publicó en 1996 un texto en el que esquematiza algunas de las generalidades de los SCA y que pueden convertirse en una buena herramienta de análisis de la innovación. En *El Orden Oculto, de cómo la adaptación crea la complejidad* (1996), Holland propone que inicialmente todos los SCA, como cualquier sistema, se componen tanto de unidades como de las relaciones que se mantienen entre ellas. Los SCA tienen en común cuatro propiedades y tres mecanismos, y aunque la investigación al respecto puede ser ampliada, él considera que todos los SCA pueden definirse por estas características.

Para Holland las unidades participantes en los SCA pueden denominarse como agentes, y meta-agentes adaptables, esto es, los SCA están constituidos por elementos activos que son diversos tanto en forma como en habilidades. El concepto de agente es muy amplio, un agente es aquel elemento que mantiene las relaciones dentro del sistema, así, por ejemplo, un agente puede ser una célula dentro de un órgano, una especie dentro de un ecosistema, una terminal de computo dentro de una red cibernética, una empresa dentro de una economía, una persona en su ciudad, etc. Los agentes tienen la capacidad de agregarse con otros agentes similares (no necesariamente idénticos) formando uno nuevo con características y comportamientos distintos a aquellos que lo forman, es decir, integrar un meta-agente. Por ejemplo, la célula se puede agregar con otras células similares y formar un órgano que será ahora el agente dentro de un sistema

corporal; una especie en una población o en un reino; etc. Esto se puede representar en la siguiente gráfica[5]:

Fig. 3. Representación de la agregación de un Sistema Complejo Adaptable.



Como se ilustra, un agente adaptable se encuentra dentro de un sistema compuesto por múltiples agentes con los cuales mantiene una serie de interrelaciones, pero en su conjunto estos agentes y sus relaciones conforman un nuevo agente (agregado) que mantendrá con otros agentes similares distintas relaciones. Esta representación de los sistemas complejos adaptables nos permite presentar tres ideas clave: a) los sistemas son jerárquicos de abajo hacia arriba (*buttom up*), es decir, la estructura de un agente está en función de los subagentes que lo componen, lo cual es consistente con la idea de sistemas jerárquicos de Simon, b) un agente mantiene relaciones con otros, pero será más intensa con los agentes cercanos (pertenecientes al mismo sistema) o con los que lo conforman (la descomposición cercana de Simon) y c) los sistemas están compuestos por agentes y las relaciones que mantienen, por lo tanto pueden ser ilustrados por redes; esto último será particularmente importante, puesto que a largo del texto las redes serán utilizadas para describir los distintos niveles de las estructuras relativas a la innovación.

Los agentes tienen un comportamiento determinado por un conjunto de reglas o normas basadas en el principio del estímulo-respuesta, esto es, bajo la estructura SI-ENTONCES. El múltiple conjunto de las combinaciones de estímulos a los que está sujeto un agente genera un conjunto de respuestas de las cuales selecciona alguna y por

[5] Reproducido de Holland (1996), p.22

medio de un continuo proceso de ensayo y error refuerza o crea nuevas reglas a partir de las cuales determina sus estrategias. Así, el agente se comporta de acuerdo a reglas simples que modifica por medio de la experiencia, lo que describe un proceso de adaptación.

2.2.1. Propiedades de los SCA

Además de los agentes y sus relaciones, Holland presenta, lo que él llama los siete básicos que es un conjunto de propiedades y mecanismos que caracterizan a los SCA. La primera propiedad es la de ***agregación***. Esta propiedad tiene dos sentidos, el primero es la simplificación que se puede hacer de los sistemas complejos, es decir, se simplifica al agregar cosas similares en categorías sin considerar peculiaridades de cada elemento, por ejemplo, animales, herramientas, empresas, etc.; esto es particularmente útil para efectos de modelación pues se abstraen elementos que puedan complicar el análisis y permite identificar unidades de análisis.[6] El segundo sentido concierne a la emergencia de agentes complejos a partir de interacciones agregadas de agentes más simples, esto es, la conformación de agentes en meta-agentes y así sucesivamente. Cabe señalar que la complejidad en general puede ser definida como la cualidad de aquello que está compuesto de forma intrincada por diversos elementos a distintos niveles y de múltiples relaciones.

Un mecanismo que permite la agregación de agentes es el ***marbeteado*** o etiquetado, esto es, la asignación de señales (marbetes) de identidad a los agentes, por ejemplo una bandera, un uniforme, un logo, etc. El marbeteado no sólo es un mecanismo de agregación sino también de supervivencia de un agente. Además, es un mecanismo de delimitación, lo que implica que nos permite identificar características ocultas de los agentes. Ello genera por lo tanto, que sea posible determinar algún grado de especialización así como condiciones que favorezcan la cooperación de los agentes.

La segunda propiedad de los SCA es la ***no-linealidad***. La linealidad es un tipo de relación matemática que puede ser entendida como que el todo es la suma ponderada de las partes. La no-linealidad implica que el todo es distinto que la suma de sus partes,

[6] Debe distinguirse que en esta propiedad se presenta un problema ontológico, puesto que al abstraer peculiaridades de los agentes y agregarlos en uno nuevo, éste último es distinto al de sus partes, es otro, con peculiaridades nuevas y distintas. Por lo tanto, si bien, la agregación (que en sí misma es una cualidad de los SCA) es metodológicamente es útil para el análisis no debe obviarse este hecho.

similar a una combinatoria matemática. Por ejemplo, si tenemos tres camisas de colores distintos y tres pantalones igualmente de distintos colores, al agregarlos podríamos tener seis prendas de vestir, esa sería una agregación lineal. Pero las relaciones que existen entre las prendas, generan combinaciones (agregaciones) distintas, la más simple desde luego, es usar una camisa junto con un pantalón, lo cual resultaría en nueve posibles formas de usarlas, y más aún, restringiendo por un lado, estas combinaciones a ciertas reglas (armonía de colores, ocasión o moda) las combinaciones resultantes podrían ser mucho menores, o por otro lado, contrario al sentido común, usar más de dos prendas simultáneamente provocaría que las posibles combinaciones aumentaran hasta 42 y si se considera además el orden de colocación llegaría hasta 1920 para el uso de más de tres prendas[7]. Naturalmente, esto permite observar la existencia de sinergias comunes a los procesos de innovación y por otro lado, nos permite observar que pequeños cambios en los agentes puede repercutir en grandes transformaciones o viceversa, esto es, un fenómeno amplificador.

Esto se vincula directamente con la tercera propiedad de los SCA que es la existencia de ***flujos*** que es todo aquello que se transmite de un agente a otro. Si pensamos en los agentes como nodos de una red, tendremos tres elementos: el nodo, los conectores (*links*) y el contenido que se transmite, el flujo. Por ejemplo, en un sistema de iluminación pública, las lámparas son los nodos, los cables son los conectores y la energía es el flujo; en la red de Internet esta tríada se manifiesta por las terminales de cómputo, cables y mensajes; y en una conversación por personas, lenguajes e información. Los flujos tiene dos efectos, el primero es el *multiplicador*, esto es, cuando un flujo pasa de agente a agente se transforma a lo largo del camino produciendo una cadena de cambios, similar al multiplicador monetario o el del gasto público. El segundo efecto es *reciclante*, esto es, en un sistema el flujo pasa por una cadena de agentes, si en la cadena hay un circuito, entonces ese flujo se introduce de nuevo en la cadena varias veces aumentando el efecto recurrentemente, por ejemplo, el reciclaje de basura permite que se reincorporen materiales a distintas cadenas de producción reduciendo el uso de recursos; otro ejemplo son las cadenas de correos electrónicos

[7] Este resultado se obtiene de la suma de las muestras ordenas sin reemplazo de tamaño 3, 4 5 y 6, a partir de un conjunto de 6 elementos.

donde es común que una misma persona reciba varias veces la misma correspondencia de distintos contactos reforzando con ello el mensaje.

La cuarta propiedad de los SCA es la ***diversidad***. La diversidad contenida en los SCA no es accidental, es evidente para este momento que los agentes son diversos, no sólo en sí mismos, sino por la interrelación que mantienen con sus componentes y los meta-agentes que forman, pero también por el ambiente en el que se encuentran. Cada sistema constituye un ambiente para el cual un agente puede comportarse adecuadamente, es decir, es apto para dicho ambiente, si no es así, se generará un hueco, un nicho, que será llenado por otro, lo cual genera diversidad. Ahora, es importante aclarar que cada agente mantiene una doble condición dentro del sistema, es, en primera instancia, un sujeto que habita *dentro* de un ambiente, pero además es *parte* constituyente del mismo, de tal modo, que las interacciones que indistintamente mantiene o cambia crean paulatinamente nuevos ambientes. Así, la diversidad es un patrón dinámico que surge tanto por la adaptación de los agentes al ambiente, como por la propagación que estos hacen al abrir un nuevo nicho (oportunidades para nuevas interacciones) que puede ser aprovechado por ellos mismos o por las modificaciones de otros agentes. Es por ello, que la diversidad, no sólo no es accidental, sino que además es una condición necesaria para la supervivencia de los agentes y del sistema en su conjunto. "La novedad perpetua es la marca distintiva de los SCA."[8]

Este sentido adaptativo necesariamente se desarrolla en un espacio temporal, esto significa que el agente, por medio de la experiencia, crea reglas de comportamiento. Sin embargo, para poder adaptarse, estas reglas inevitablemente deben de cambiar, puesto que el resto del ambiente lo hace, de tal modo debe tener la habilidad de anticiparse a las consecuencias sus acciones, y lo puede hacer si construye ***modelos internos*** de las relaciones que existen en su realidad y los posibles resultados que se desprendan de sus propios movimientos. Así, los modelos internos son mecanismos de anticipación. Por ejemplo, si un joven estudiante requiere información de Internet para realizar una tarea, puede abrir su página principal, y navegar de página en página seleccionando vínculos que considere que se relacionan con el tema que busca, realizar este proceso le tomaría muchas horas de ensayo y error hasta conseguir lo que busca, si

[8] *Ibidem*, p. 46

es que lo logra; alternativamente, podría seleccionar escribir la dirección (ya conocida) de un buscador, escribir algunas palabras relacionadas con el tema que busca y de un conjunto mucho más pequeño de opciones seleccionar algunas páginas que le resulten útiles para su tarea, este proceso le llevará sólo unos cuantos minutos, así este joven tiene un modelo interno, en este caso, una regla de procedimiento, que le permite anticipar que encontrará con este modo la información que requiere incluso sin que sepa con precisión cuál es. Naturalmente, esta regla (modelo interno) se impondrá sobre la primera (buscar de página en página usando los vínculos que tengan) puesto que implica un ahorro en tiempo y esfuerzo. Los modelos internos, no necesariamente están determinados por la inteligencia de los agentes, sino que son el resultado de un proceso evolutivo, por ejemplo, las xerófitas (especies vegetales con raíces poco profundas y extendidas) "saben" que dada la escasez de lluvia en los desiertos requieren que sus raíces puedan absorber la mayor cantidad de humedad posible y por ello, de generación en generación, "aprenden", por medio de un proceso de selección natural, a mantener raíces a ras de suelo abarcando la mayor parte de territorio posible, este es el caso de los arbustos del desierto, pero también es el caso de algunas plantas alpinas que utilizan este mismo mecanismo con la variante de que no es las escasez de lluvia lo que provoca las características de sus raíces, sino la constante congelación del suelo que les impide absorber el agua profunda. Los modelos internos pueden ser entonces de dos tipos, *tácitos* y *manifiestos*. Los *tácitos* describen una acción actual motivada por la predicción implícita de algún estado futuro deseado, como en el caso de las xerófitas; y los *manifiestos* utilizan las exploraciones explícitas de alternativas, como el caso del estudiante.

Sin embargo, como se puede observar hay una paradoja, por un lado, los modelos internos son reglas de comportamiento basado en muestras limitadas de un medio ambiente perennemente cambiante, y por otro lado, el modelo sólo puede ser útil si existe una especie de repetición de las situaciones modeladas. Para poder resolver este problema se recurre al uso del último mecanismo característico de los SCA, los ***bloques de construcción***. Esto es, descomponer escenas complejas en partes más simples y reagrupar esas partes componentes en una gran variedad de formas. Esas partes simples (bloques de construcción) son usadas en repetidas ocasiones ganando experiencia aunque la combinación de ellas nunca sea la misma. Son ejemplo de bloques de

construcción, los juguetes para armar que con un conjunto limitado de piezas similares se pueden crear cantidades inmensas de figuras; las notas musicales que con algunas cuantas se pueden crear infinitas melodías; las letras que son capaces de formar miles de palabras escritas con significado e incluso solventes para codificar neologismos; y, como se explicará más adelante, la forma de producción y diseño modular.

Para el caso de la formación de reglas (modelos internos) regresemos al ejemplo del estudiante que busca en Internet su tarea. Supongamos que le piden un reporte sobre la historia de la fotografía, para encontrar esta información él, en general, utilizará tres pasos, a) escribirá la dirección electrónica de un buscador, por ejemplo "google.com", b) escribirá algunas palabras clave que le restrinjan su búsqueda, por ejemplo "historia de la fotografía", y c) a partir de los resultados obtenidos, seleccionará la información que le resulte útil. Si encuentra la información que deseaba entonces la regla de procedimiento será considerada por el joven como correcta, ahora, si lo que él busca es comprar un libro de su autor favorito, utilizará los mismo pasos (bloques de construcción) pero con distintos contenidos, primero escribirá la dirección de una librería, después el nombre del autor y por último seleccionará el texto que prefiera. Si de nuevo consigue lo que quería, en general considerará que la regla de búsqueda es la correcta, sin embargo, sin en ninguno de los dos casos lo consigue, probará otros ensayos de búsqueda hasta formar la regla (para distintos contenidos) que le resulte útil usando una combinación de los mismos bloques de construcción u otros. De hecho, como se puede notar, el paso a) y b) es el mismo bloque de construcción repetido. Así, se podría pensar que cuando los modelos internos son tácitos (como el caso de las xerófitas) el proceso de descubrimiento y combinación de los bloques de construcción está sujeto a la evolución a lo largo del tiempo, y cuando son modelos manifiestos (como el del estudiante) el tiempo juega un menor papel.

2.2.2. Emergencia de reglas.

Definidas estas características básicas de los SCA (agregación, marbeteado, no-linealidad, flujos, diversidad, modelos internos y bloques de construcción) podemos definir el procedimiento que utiliza un agente adaptable para la formación de sus reglas y que consta de tres componentes:

a) Un sistema de desempeño: el cual especifica las habilidades del agente en un momento inicial. Los elementos básicos de este sistema de desempeño son: 1) un conjunto de detectores que representan la habilidad del agente para extraer información de su medio ambiente, 2) un conjunto de reglas SI-ENTONCES que representan su capacidad para interactuar sobre su medio ambiente y 3) un conjunto de efectores que representan la capacidad para afectar dicho ambiente.

b) Un algoritmo de asignación de crédito: dotar al sistema con hipótesis que anticipen las consecuencias futuras de sus acciones en términos de algún tipo de retribución que permita reforzar las reglas para posteriores acciones.[9]

c) El descubrimiento de reglas: la generación de hipótesis verosímiles se centra en el uso de los bloques de construcción de tal modo que la experiencia se integra directamente y la innovación tiene una amplia gama de posibilidades.

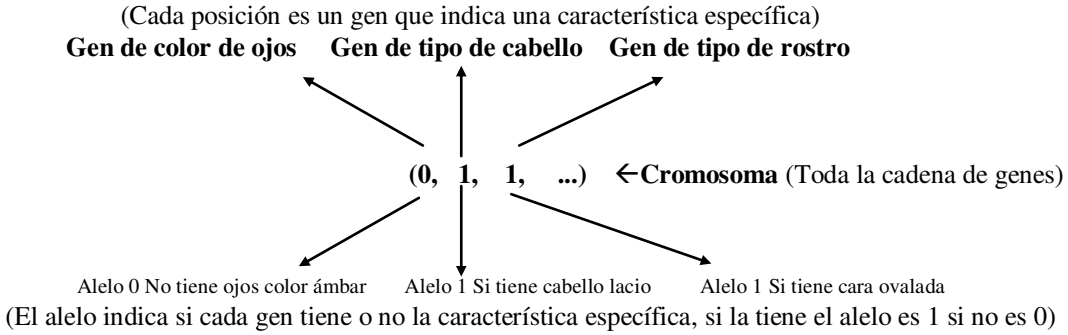
La construcción de los distintos algoritmos depende desde luego tanto de las capacidades con las que cuenta el agente como de las condiciones de su medio ambiente. Una posible forma de representar las construcciones de estas reglas es por medio del uso de los algoritmos genéticos que desarrolló el propio Holland. Los algoritmos genéticos describen dichas condiciones y ambientes de los agentes por medio de cadenas binarias que se denominan *esquemas*, los cuales pueden cambiar en el tiempo por distintos mecanismos. La representación más general de estos esquemas es el conjunto $\{0,1,\#,\&\}^L$. Esto es una metáfora genética donde cada conjunto particular $\{0,1,\#,\&\}^L$ es una especie de cromosoma de longitud L, es decir, un cromosoma que tiene L-genes. Cada posición a lo largo del cromosoma es un gen que determina alguna característica específica y cada gen tiene dos posibles estados, 1 y 0 si tiene o no la característica específica (por ejemplo, si se tratase de un humano, la primera posición indica la característica del color de ojos, por ejemplo, si los tiene color ámbar o no, la segunda, el tipo de cabello, por ejemplo, si lo tiene lacio o no, la tercera, la forma del rostro, por ejemplo, si lo tiene ovalado o no, etc.), en la metáfora genética cada estado es lo que se conoce como alelo[10].

---

[9] Esta asignación de crédito, es similar a la discusión de valor del capítulo anterior. Se agina un valor que se manifiesta de distinta forma (supervivencia, satisfacción, utilidad, recompensa, aptitud, etc.) dependiendo del sistema.

[10] Un alelo es el estado de un gen. En los celebres estudios de Mendel, se recordará que las flores pueden tener pétalos de dos colores, rojos o blancos, si son rojos el gen será *R*, y si son blancos el gen será *r*.

Fig. 4. Estructura genética



Los símbolos # y & indican la existencia de un gen (característica) que no tiene relevancia para un caso específico, lo que permite crear bloques de construcción, pero distinguiendo con el símbolo # si se trata de un conjunto de estados (alelo) y el símbolo & si se trata de un conjunto de condiciones. Por lo tanto, el símbolo # acepta sólo dos estados, 1 y 0 si fuera un estado (alelo) relevante, mientras que el símbolo & acepta tres, 1, 0 y # si fuera una característica (gen) relevante. Por ejemplo, (100#1) indica un cromosoma (o un estado específico de la naturaleza) que tiene 5 posibles características (L = 5), el cuarto gen (característica) no es relevante para la formación de la regla, pero existe es decir, se abstrae su significación formando con ello un bloque de construcción compuesto por la primera, segunda, tercera y quinta característica específica, si fuera relevante, entonces tendríamos dos cromosomas –estados de la naturaleza- distintos (10011) y (10001). Ahora si el caso fuera (100&1), significa de igual modo, que existe la característica (gen) que ocupa la cuarta posición pero no es relevante para la formación de la regla, si lo fuera, tendríamos tres posibles casos, (10011), (10001) y (100#1), los dos primeros que consideran específicamente el estado de la cuarta característica para la formación de la regla y el tercero donde se sigue considerando irrelevante. Esta distinción es útil para atacar el problema de la no-linealidad, puesto que es claro que para dos estados diferentes se puede tener el mismo efecto, como sucede en el caso de las xerófitas, donde un estado es desértico y el otro es alpino, y la planta responde de la misma forma, raíces poco profundas y extendidas. Además, esta no-linealidad también se debe al hecho de que un gen puede representar más de una

Estos posibles estados del gen (R o r) se denomina alelo. En nuestro caso, R = 1 y r = 0. El tipo de alelo R o r es el genotipo, su manifestación pétalos rojos o blancos es el fenotipo.

característica o simétricamente para representar una característica se requiere de más de un gen. Por ejemplo, un paquete genético que indique que una persona tenga ojos color ámbar puede representarse con dos genes ($L = 2$), donde la primera posición indique si la persona tiene o no ojos y la segunda que indique si son de color ámbar o no. Así, para que una persona tenga ojos color ámbar se requiere un paquete genético (11), si fuera (01), no se tendría la característica deseada, pues para tener ojos de color ámbar desde luego se requiere primero tener ojos[11]. Para aplicaciones prácticas la distinción # y & es relevante sólo en algunos casos.

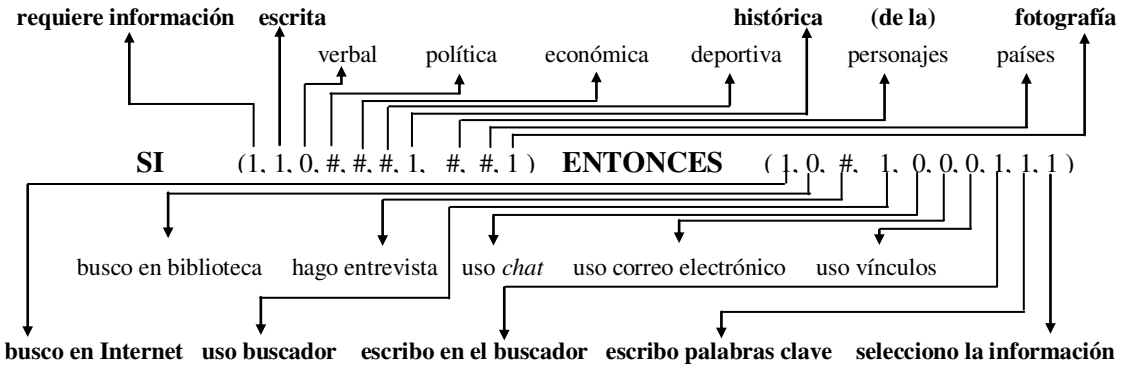
2.2.2.1. Sistema de desempeño.

Ya que se tiene una forma de representar el estado de la naturaleza y a los agentes que interaccionan con ella es posible comenzar con la formación de reglas. Y esto se hace bajo el esquema SI-ENTONCES. Esto es, el agente tiene un conjunto de detectores para determinar el estado de la naturaleza (por ejemplo, los cinco sentidos), de tal modo que puede determinar un caso específico de la naturaleza, por ejemplo, (10011). Enseguida abstrae la información que no considera importante y crea bloques de construcción para los que ya tienen reglas hechas, por ejemplo, (10##1), es decir, la tercera y cuarta característica no la considera importante, y usa la regla SI (10##1) ENTONCES (001#1) que representa el estado de cosas que realiza. Siguiendo el ejemplo de nuestro estudiante, él "requiere información sobre la historia de la fotografía". Entonces se presenta lo siguiente, SI (1,1,0,#,#,#,1,#,#,1) ENTONCES (1,0,#,1,0,0,0,1,1,1) lo cual arbitrariamente representa lo siguiente. En la condición (1,1,0,#,#,#,1,#,#,1) la primera posición significa "requiere información", la segunda "información escrita", la tercera "información verbal", la cuarta, quinta y sexta significan información "política", "económica" y "deportiva" respectivamente, la séptima significa "histórica" y las tres restantes significan "personajes", "países" y "fotografía" respectivamente. Los 1's representan una estado afirmativo, los 0's que definitivamente no se cumple la característica y los #'s que "no es importante". Se lee por lo tanto, "requiere información escrita, no verbal, sobre la historia de la fotografía".

[11] La relación de interdependencia entre dos o más genes se denomina relación epistática. Ver nota 24.

Las acciones que toma en consecuencia están representadas en la respuesta (1,0,#,1,0,0,0,1,1,1) donde la primera posición representa "busco en Internet", la segunda "busco en la biblioteca", la tercera "hago una entrevista", etc.; los siguientes cuatro dígitos representan las aplicaciones de Internet, así, el primero es "uso un buscador", la segunda "uso el *chat*", la tercera "uso el correo electrónico", y la cuarta, "uso los vínculos"; el siguiente representa "escribir en el buscador", la otra "escribir palabras clave" y la última "seleccionar la información". Así, la acción que realiza el estudiante es "buscar en Internet, no en la biblioteca, usar un buscador, escribir en el buscador palabras clave y seleccionar la información". Ver Fig. 5. A todo esto es lo que llama Holland llama sistema de desempeño.

Fig. 5. Ejemplo de la regla SI-ENTONCES



2.2.2.2. Algoritmo de asignación de valor.

A esta regla se le asigna un *valor* que Holland le llama fuerza, de tal modo que si la regla es exitosa (por ejemplo, si el estudiante encuentra lo que busca, volverá a usar la regla bajo condiciones similares) se le asigna un número que califica el desempeño de esa regla[12] a partir de la repetición de su uso. Esta asignación de valor está en función de la *aptitud* (*fitness*) de la regla, es decir, en genética el grado de aptitud de una especie con su medio, determina su capacidad de sobrevivir por medio de la reproducción, esto es, si es apta, entonces sobrevivirá porque se reproduce. En el caso de las reglas, la

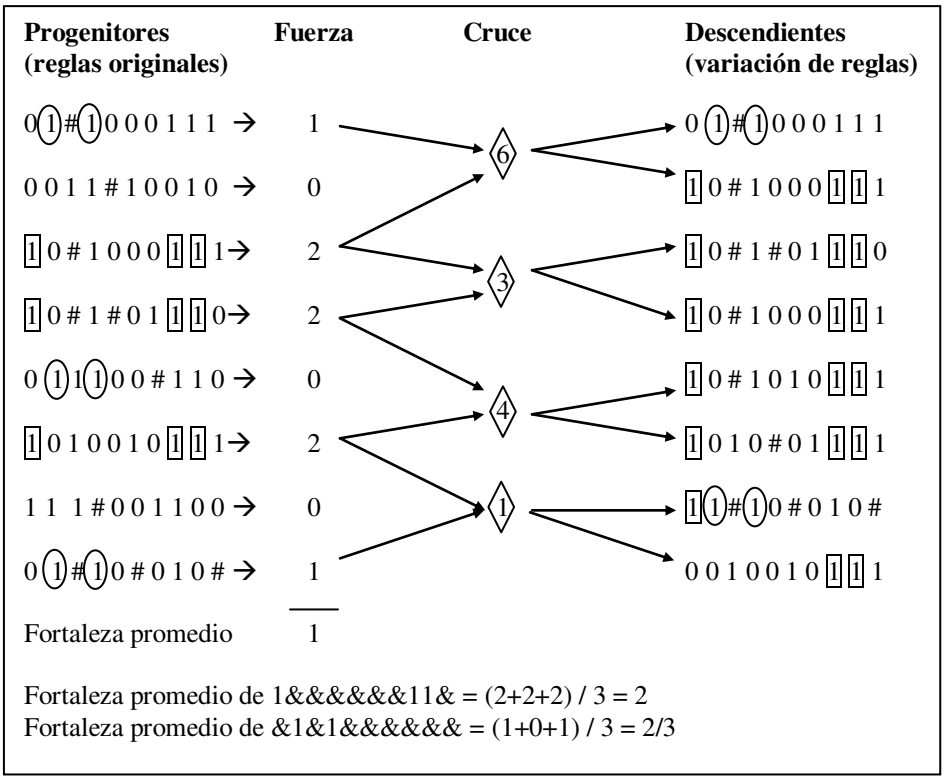
[12] Esto es lo que Holland llama algoritmo de asignación de crédito.

supervivencia depende de la "utilidad" de la regla, es decir, si la regla es útil (apta o adecuada) entonces se repetirá su uso en futuras situaciones. Así, por ejemplo, en el caso del estudiante a la regla que utilizó –la respuesta (1,0,#,1,0,0,0,1,1,1)- le asigna un valor de 2 si utiliza la regla dos veces más para condiciones similares. Ahora, si la respuesta variara, por ejemplo, cambiando el estado de la primera y segunda posición y lo demás se mantuviera igual entonces cada vez que SI (1,1,0,#,#,#,1,#,#,1)[13] ENTONCES (0,1,#,1,0,0,0,1,1,1) es decir, si sólo cambiamos el estado "busco en Internet" por "no busco en Internet" y "no busco en la biblioteca" por "busco en la biblioteca", entonces la nueva respuesta sería SI (1,1,0,#,#,#,1,#,#,1) -"requiere información escrita, no verbal, sobre la historia de la fotografía"- ENTONCES (0,1,#,1,0,0,0,1,1,1) –"busco en la biblioteca, no en Internet, uso un buscador, escribo palabras clave y selecciono la información". Si esta nueva opción tuviera una mayor fuerza (por ejemplo 3) que el promedio de las demás se convertiría entonces en una regla, pero si tuviera una fuerza menor, por ejemplo 1, entonces la regla original se mantendría. Es importante notar que es el propio agente el que le asigna el valor de estas reglas, no por un cálculo exhaustivo de todas las variables sino, simplemente por la acción de repetir la regla en función de sus resultados. Es importante señalar que una regla específica obtiene su valor de aptitud en su conjunto, es decir, el cromosoma completo, y no sólo una parte específica.

Supongamos en nuestro ejemplo que para cada una de nuestras dos posibles reglas, lo más importante de la primera es "buscar en Internet, escribir en un buscador y escribir palabras clave" (1,&,&,&,&,&,&,1,1,&), mientras que para la segunda, lo más importante es "buscar en la biblioteca, y usar un buscador" (&,1,&,1,&,&,&,&,&,&), es decir, creamos bloques de construcción que definen la regla en su esencia. Para ilustrar el sentido de la fuerza de las reglas observe el siguiente cuadro[14].

[13] Note que es la misma condición del mensaje inicial.
[14] Reproducido de Holland (1996). p. 53

Fig. 6. Algoritmo Genético



Como se ilustra, la primera regla que se distingue con los recuadros que forman un bloque de construcción esencial, se cruzan con otras reglas generando variantes, cada una de estas reglas se cruza con dos (dada su fuerza de 2) y transmite a sus descendientes parte o la totalidad del bloque de construcción esencial. La segunda regla, que se distingue con los óvalos también se cruza, pero en menos ocasiones (una vez cada regla). Así, el valor o aptitud promedio de la primera regla es 2, mientras que el de la segunda es de 2/3. Por lo tanto, la primera regla, se seguirá utilizando generación tras generación con mayor frecuencia que la segunda, ello se observa en las reglas descendientes en donde cinco de ocho mantienen el bloque esencial de la primera regla, y dos de ellas son la propia regla original. En otras palabras, las reglas se convierten en una especie de población que conforme pasa el tiempo se van adecuando al ambiente y por lo tanto, sobreviven. La metáfora de las poblaciones también nos sirve para resaltar dos fenómenos: a) pueden coexistir varias reglas simultáneamente aunque el uso de unas sea más frecuente que el de otras y; b) las reglas son variaciones de un esquema más o menos estable. Esto último significa que a pesar de que en algunas ocasiones

encontremos respuestas "perfectas", no siempre ocurren (coma la existencia de genios), pero lo que sí permanece, es un paquete adecuado básico que determina posibles éxitos futuros, una regla.

2.2.2.3. .Descubrimiento de reglas.

El cuadro anterior (Fig. 6) también nos es útil para mostrar una de las dos formas en la que se modifican (varían o innovan) las reglas específicas, por *cruzamiento*. Esto es, aleatoriamente, dos reglas se combinan manteniendo características de cada una. Por ejemplo, en el cuadro, las últimas reglas se cruzan manteniendo cada una el primer gen y cruzando (intercambiando) el resto de sus genes. El punto de cruce es el número resaltado con un rombo. Así, se logran hacer variaciones de las reglas pasadas para formar nuevas. Es aquí donde la experiencia cobra sentido. Es importante señalar, que tanto el punto de cruce como las reglas que se combinan son aleatorios de tal modo que las posibles combinaciones no están determinadas por otra razón, más que por su éxito probado.

La otra forma de variación es la *mutación*, esto es, en una porción muy pequeña de los casos, uno de los genes (características) fijos varía aleatoriamente, lo que puede generar éxitos o fracasos inesperados que pueden convertirse en regla general o por el contrario, el efecto puede ser tan marginal que no afecte el comportamiento futuro. Sea cual sea el resultado, es finalmente, un mecanismo de variación.

Sin embargo, es pertinente señalar que, la emergencia de estas reglas implica la evaluación de miles de combinaciones[15]. El cruzamiento, reduce las posibilidades de prueba y en consecuencia hace plausible algún tipo de evaluación basado en la experiencia, aunque la muestra siga siendo amplia. El problema, es que si bien ganamos por este medio la posibilidad de cálculo, perdemos un conjunto mucho mayor de posibilidad de mejora potencial, y es por ello que la mutación resulta importante porque aleatoriamente puede abrir nuevas ventas de oportunidades que repercuta en mejores reglas.

[15] En la primera regla, todas la combinaciones manteniendo tres características fijas, nuestro bloque construcción 1&&&&&&11& serían de un orden de 5040, esto es, la muestra de combinaciones ordenadas sin rezago de tamaño 1, en este caso 7!, y para la segunda regla &1&1&&&&&& sería de 40320, es decir, 8!.

Así, con base en la recombinación de los bloques de construcción es posible la creación o fortalecimiento de las reglas que son evaluadas con base en la experiencia y el aprendizaje generado por la variación (innovación). Y en concreto esto se logra por los siguientes pasos[16]:

1) *Reproducción de acuerdo con la aptitud*. Se selecciona dentro de la población actual las cadenas que actuarán como padres. Cuanto más apta sea la cadena (cuanto más fuerte sea la regla), más probabilidades tendrá de ser elegida como uno de los padres. Una cadena de elevada aptitud puede ser padre varias veces.
2) *Recombinación*. Las cadenas progenitoras son apareadas, cruzadas y mutadas para producir secuencias hijas.
3) *Reemplazo*. Las secuencias hijas remplazan a las secuencias elegidas al azar entre la población actual. Este ciclo se repite una y otra vez para producir una sucesión de generaciones.

En conclusión, el algoritmo genético es un procedimiento para la formación de reglas de conducta de los agentes inmersos en un sistema complejo, basado en la experiencia y aprendizaje, por medio de la recombinación de bloques de construcción que determinan los modelos internos de los agentes.

Una aportación a los SCA es el trabajo de Kauffman (1993) donde presenta algunas de las relaciones construidas con base en redes. Una de estas relaciones fundamentales es la que tiene que ver con la asignación de crédito (nivel de aptitud) en lo que llamó el modelo NK. Este modelo, aunque sólo es un caso particular de las posibles estructuras de las relaciones de los agentes, resulta útil puesto que permite determinar por medio de lo que él llama "paisajes de aptitud" (*fitness landscapes*) puntos que indican el valor (fuerza) que tiene cada cromosoma (condición de la naturaleza o regla generada) y los posibles movimientos que se pueden hacer. Por otro lado, también resulta útil, puesto que implícitamente contiene los principios de

[16] I*bid,* p.85.

descomposición cercana de Simon y puede (según lo rugoso que sea el paisaje) determinar un grado de complejidad.

2.3. LAS APORTACIONES DE KAUFFMAN

Kauffman (1993), en su libro *The origins of order, self-organitation and selection in evolution*, presenta un modelo, el NK, para explicar que, bajo ciertas circunstancias, la selección exhaustiva no necesariamente es el mejor mecanismo para la adaptación, por lo que mecanismos como el de la autoorganización pueden emerger.

La estructura del modelo se basa en los siguientes principios:

1. Existe una estructura de paisajes accidentados de *aptitud* (*fitness*)[17] (condiciones iniciales y en coevolución) subyacentes en la evolución.
2. La adaptación progresa típicamente por medio de pequeños cambios en búsquedas ***locales*** en los espacios de posibilidades (lo que implica la existencia de máximos y mínimos locales y globales)
3. El proceso de adaptación es complejo, es decir, es una ***optimización*** combinatoria.
4. En tales búsquedas de optimización, muchas partes y procesos deben de coordinarse para alcanzar alguna medida del éxito global, pero las ***restricciones del diseño del conflicto***[18] limitan los resultados alcanzados. (Incrementos en los

[17] La selección natural parte de tres elementos fundamentales: la variación, la herencia y la aptitud (*fitness)*, donde este último es el mecanismo de selección. El concepto de selección se presenta como un sistema lógico, donde se dan unas condiciones necesarias y suficientes para que se produzca el proceso de selección natural. Si existe variación entre las entidades de una población, si las variantes difieren en sus niveles de aptitud (*fitness)* o eficacia biológica (es decir, unas variantes dejan más descendientes o sobreviven más que otras) y si la variación es heredable, entonces se sigue, como corolario, un cambio evolutivo por selección natural. La palabra *fitness* generalmente no se traduce sin embargo, se puede definir como aptitud o eficacia biológica.

[18] El conflicto se refiere al hecho de que los individuos optan por moverse de un punto original (condición inicial) a un punto que tenga un mayor valor de aptitud. El movimiento, no es el resultado de una decisión teleológica, sino, es producto de la selección natural, es decir, las poblaciones se mueven y se reproducen en una mayor tasa en aquellas que tengan un nivel de aptitud más alto. Las restricciones del diseño del conflicto, se refieren entonces a la estructura en la que se combinan tanto los distintos posibles puntos a los que pueden llegar los individuos, como a los diversos valores de aptitud correspondientes a cada punto.

niveles de las restricciones de conflicto hacen paisajes más rugosas y con múltiples picos[19]).

5. Cada genotipo tiene un nivel de aptitud propio (*fitness*) y las distribuciones de los valores de aptitud sobre el espacio de genotipo constituye el paisaje de eficacia biológica. Asume por simplificación que cada genotipo tiene un solo nivel de aptitud.
6. Dependiendo de la distribución de los valores de aptitud, el paisaje de aptitud será más o menos montañoso.
7. La evolución adaptativa de una población es un proceso de escalamiento de colinas.
8. La población puede pensarse como el grupo de individuos estrecho o extendido localizado en diferentes puntos del paisaje.
9. Las mutaciones mueven a un individuo o su descendencia a puntos vecinos en el paisaje.
10. La selección es reflejada en la reproducción diferencial de los individuos con diferentes valores de aptitud.
11. En el tiempo, los grupos de individuos representan poblaciones con flujos sobre el paisaje de aptitud.
12. Así, la adaptación de una población depende de:
    a) Que tan montañoso sea el paisaje de aptitud
    b) Que tan grande sea la población; y
    c) La tasa de variación a la que mueve a un individuo de un genotipo a otro en el espacio. Así como de la sexualidad de la población para mezclarse con otros individuos en otros puntos del paisaje.[20]

[19] Es decir, entre mayor sea el número de combinaciones de los mismos elementos, mayores puntos de evaluación se tendrán en el mismo espacio. Cada punto de evaluación es un pico y por lo tanto al aumentar las combinaciones se tendrá como resultado una mayor cantidad de picos en el mismo espacio y esto generará un aspecto más "rugoso" del paisaje. Cabe señalar que cada combinación representa una interacción específica entre los elementos, por lo tanto, si las restricciones del diseño del conflicto son tales que las combinaciones entre los elementos son las máximas, entonces se tendrá el paisaje más rugoso posible, con todos los picos posibles consecuentes con el mayor número de interacciones entre los elementos.

[20] Esto, evidentemente es lo mismo que planteaba Holland sobre el cruzamiento y mutación.

Un agente[21], se compone de un conjunto de *N*-elementos[22] que le da forma dependiendo el estado (alelo) de esos elementos. Así, *N* se refiere al número de partes de un sistema (genes de un cromosoma, aminoácidos de una proteína o parámetros de un artefacto[23]). Cada una de las partes (genes) otorga un valor de aptitud de forma independiente al agente pero también, por la relación que existe entre las partes. Esta relación se define con la variable *K,* es decir, este coeficiente indica el grado de *interdependencia* de cada una de las partes. En genética esta propiedad es conocida como relación epistática[24].

Cada uno de los *N* elementos puede tener distintos estados, por simplicidad se presentan sólo dos estados –alelo- (0 y 1). Cada conjunto específico de elementos constituyen un ensamble y es a su vez una variación de cada uno de los otros. El conjunto de cada una de las variaciones de los agentes a partir de su vecindad más cercana forma un paisaje de aptitud (*fitness landscape*).

Así, por ejemplo, en una versión muy simple tenemos un agente que se compone de tres elementos (*a, b, c*) es decir, *N* = 3, cada uno de los elementos tienen dos estados (0, 1), que aportan un nivel de aptitud en una distribución normal aleatoria entre [0,1]. Para cada elemento existe un nivel de eficiencia biológica w_i, i = *1, 2, 3*. De tal modo que la eficiencia biológica del agente será el promedio simple de la eficiencia de los elementos:

$$\overline{w} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w_i$$

[21] Utilizo la noción de agente similar a Holland (que a su vez retomó de la teoría económica) porque esta figura permite tener un amplio grado de generalidad. De tal modo, que el agente puede ser un genoma, una proteína; o un componente, un módulo, un producto o una tecnología para el caso de la innovación tecnológica, sin que se altere el sentido del modelo.

[22] *N* en el caso de Kauffman es similar a la *L* de Holland, es decir, el número de genes (características) que componen al cromosoma (agente). Sin embargo, difiere en el hecho de que Holland no solo distingue los estados (alelos) sino, además, la posibilidad de distinguir la relevancia (abstracción) por medio de bloques de construcción a partir del uso de los símbolos # y &.

[23] Ver la matriz ***X*** de los parámetros de diseño, Fig. 10 del siguiente capítulo.

[24] La relación epistática se refiere al grado de interdependencia entre genes, esto es, la relación no-lineal entre dos o más genes, que como se explicó arriba significa que un gen puede determinar más de una característica o un característica se determina por dos o más genes, como el ejemplo de los ojos color ámbar: para tener ojos color ámbar se requiere tener primero ojos. Ver nota 11.

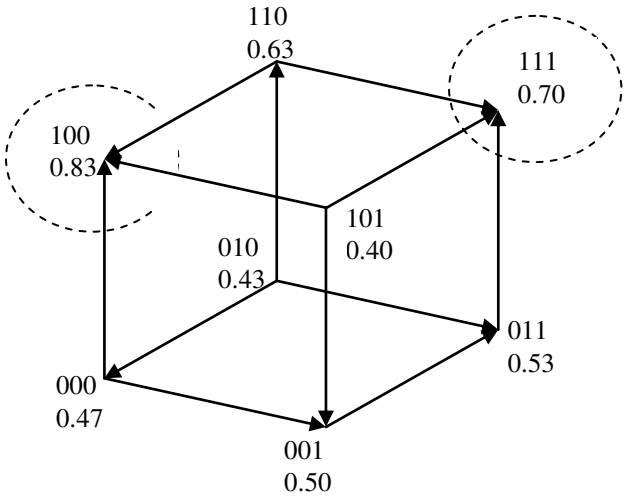
Considerando la máxima interrelación de los elementos $K = 2$, es decir, *a* se relaciona con *b* y *c*; *b* con *a* y *c*; y *c* con *a* y *b*. En otras palabras, cada uno mantiene 2 relaciones. Obtenemos la siguiente tabla de valores de aptitud.

Tabla 1. Valores de aptitud [25]

a	b	c	w_1	w_2	w_3	$\overline{w}$
0	0	0	0.6	0.3	0.5	0.47
0	0	1	0.1	0.5	0.9	0.50
0	1	0	0.4	0.8	0.1	0.43
0	1	1	0.3	0.5	0.8	0.53
1	0	0	0.9	0.9	0.7	0.83
1	0	1	0.7	0.2	0.3	0.40
1	1	0	0.6	0.7	0.6	0.63
1	1	1	0.7	0.9	0.5	0.70

A partir de estos datos, se puede representar el paisaje de aptitud con el siguiente cubo Boleano:

Fig. 7. Cubo Boleano representativo de un paisaje de aptitud



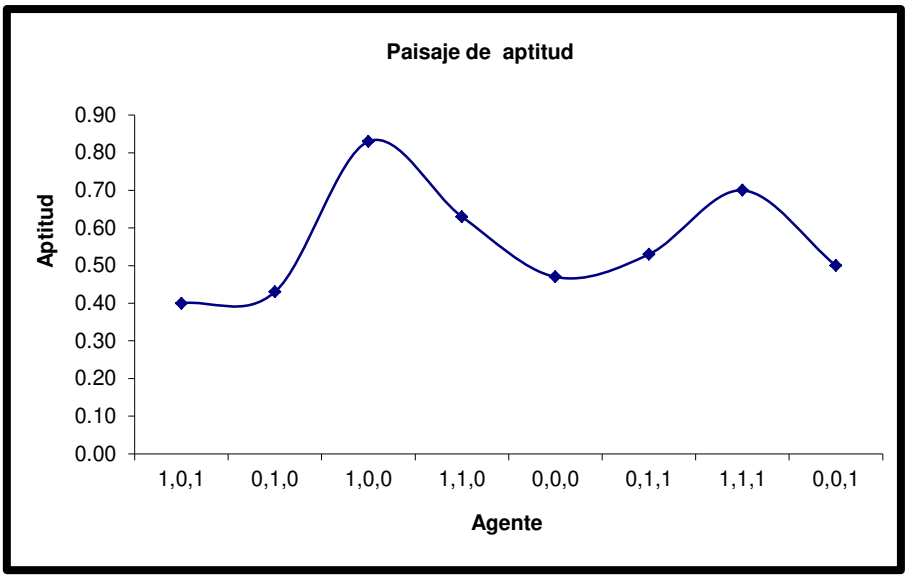
En este diagrama se puede observar que cada agente (tríada ordenada de ceros y unos) es una variación del otro, y su vecindad depende del cambio mínimo en un elemento o gen (*a*, *b* o *c*). Cada agente tiene un valor de aptitud y al variar un alelo, cambia el valor del conjunto ordenado. Si aumenta el valor de aptitud, significa que la

[25] Los datos así como el diagrama fue tomado de Kauffman (1993) p. 42

reproducción de esos agentes también lo hace, es decir, crece el tamaño de esa población. Y si por el contrario, disminuye el valor de aptitud entonces se reduce la población de esos agentes. Las flechas indican las direcciones de los flujos de población ante las variaciones de cada gen (independientemente de la traída ordenada de la que se parta), como si la población "siguiera" el nivel de aptitud promedio ($\overline{w}$) mayor, puesto que las poblaciones al encontrar dicho nivel mayor de aptitud se reproducen con mayor rapidez en comparación con niveles de aptitud relativamente menores de su vecindad. Finalmente, y como se puede observar, en los círculos se encuentran los máximos posibles, ya sean locales o globales. Note, que dependiendo del lugar donde parta la población y la ruta que elija, tendrá la posibilidad de llegar a un óptimo global o no, más adelante se detallaré esto.

Por otro lado, quizás la idea de paisaje podría verse mejor en la siguiente gráfica (Fig. 8) que no es otra cosa que un reflejo del cubo anterior ordenada de forma *ad hoc*.

Fig. 8. Representación ad hoc de un paisaje de aptitud.



Como se ilustra en la gráfica, la metáfora de los paisajes de aptitud, se refiere al hecho de que cada agente, dependiendo la combinación de los elementos que lo forman, tendrán una mayor o menor posibilidad de reproducirse, sobrevivir. Eso generará picos

y valles similares a un paisaje. Sin embargo, como se puede observar, para que las poblaciones puedan reproducirse con mayor eficacia, con un valor de aptitud mayor, es necesario que modifiquen algunos de los valores de sus características, en otras palabras que varíen algunos de sus genes. Por ejemplo, la tríada, (0,1,0) que tiene un valor de aptitud de 0.43, puede en un primer paso, modificarse en (0,1,1), (0,0,1) y (1,1,0) lo que significa que en cualquiera de las tres posibilidades mejoraría su nivel de aptitud, es decir, si la población (0,1,0) modificara cualquiera de sus genes, tendría mayores probabilidades de sobrevivir, pero, los individuos que cambien en la forma (1,1,0) se adaptarán mejor que el resto puesto que el nivel de aptitud es mayor 0.63 frente al 0.47 y 0.53 de las otras combinaciones. Pero, no sólo se puede quedar ahí, si de nuevo variaran, tendría dos opciones, cambiar de (1,1,0) a (1,0,0) o a (1,1,1) y si lo hace en la primera opción, se adaptaría más que en la segunda porque tendría un nivel de aptitud de 0.80 frente a 0.70 de la otra. Ahora, si por ejemplo, la tríada (0,1,1) puede en un primer paso, modificarse de tres formas distintas, (0,1,0), (0,0,1) y (1,1,1) la población que varíe en esta forma, aumentará su nivel de aptitud a 0.70, y se estabilizará ahí, lo cual significa que no pasará al mayor nivel de aptitud posible, es decir, se quedará en un máximo local. Esto es similar a la limitación del mecanismo de cruce que determinaba Holland. Es decir, el cruce permite tener un universo más pequeño para encontrar mejores reglas (mayor fuerza o en este caso mayor nivel de aptitud) pero limita la posibilidad de encontrar las mejores. Es importante señalar, que el agente no cambia porque busque un valor mayor de aptitud, sino por el contrario, puesto que tiene una aptitud más alta se reproduce más rápidamente. Así, los niveles de aptitud máximos de los agentes se convierten *ex post* en algo similar a un atractor de la población.

En resumen, el modelo NK nos permite determinar:

1. El número de picos en el espacio de los agentes
2. La longitud del camino, por medio de variaciones vecinas, para llegar al máximo
3. El total de pruebas de variación antes de llegar al optimo
4. La tasa de aceptación de variaciones a lo largo del camino
5. El número de óptimos alternativos a los que puede llegar un agente
6. El número de agentes que llegan al mismo optimo

Mirando detalladamente, este modelo, por su propia estructura, puede resultar útil en dos planos distintos. El modelo permite determinar la relación que existe entre

cada elemento que forma a un agente (regla, o condición de la naturaleza), es decir, la relación entre los genes. Si esta relación es pequeña o nula, el efecto que provoca en los valores de los picos es doble, por un lado, se tendrá menos picos y por lo tanto el paisaje "lucirá" relativamente plano, y por el otro lado, si la relación es muy alta entonces se tendrán muchos picos con valores de aptitud distintos generando un paisaje rugoso. De tal modo que el coeficiente *K* puede ser entendido, como un indicador del nivel de complejidad de sistema, lo cual para los objetivos de este trabajo es fundamental puesto que puede ser una forma de representar la descomposición cercana que introdujo Simon.

Por otro lado, el modelo permite describir otra de las ideas principales de Simon, que es la jerarquía de sistemas, el hecho de que cada uno de los agentes sólo se pueda mover en la vecindad, significa que existe una mayor relación de los elementos cercanos que contiene un agente (sistema o subsistema) que con el resto, por lo tanto, los cambios que pueda hacer el agente sólo están, por lo regular, contenidos en un espacio y para poder hacer mayores cambios es necesario realizar un proceso de exploración relativamente amplio.

2.4. LAS APORTACIONES DE LA TEORÍA DE REDES.

Las redes son un instrumento analítico que permite observar la constitución de los sistemas. Gran parte de su avance se centra en la teoría de grafos. De hecho, el modelo NK de Kauffman es un sistema basado en redes (el modelo también es conocido como el de las redes de Kauffman) cada agente N es un nodo que puede tener o no con otros agentes (o nodos) medido por el número de aristas (o vínculos) K. Es por ello que el modelo NK es útil para el análisis que hacen algunos autores sobre la modularidad (Frenken, 2000, Dosi *et al.*, 2002) puesto que éste es un modo que representa bien los problemas de descomposición cercana. Sin embargo, este modelo presenta un problema propio de la teoría de redes o sistemas. Es en realidad un caso particular de las redes.

Barabási (2002), presenta un debate interesante entre sistemas aleatorios (como el de Kauffman) y ordenados. Explica que autores como Erdős y Rényi (1959) al observar que las vinculaciones o conexiones entre los nodos no mantenían una relación simple y que en poco tiempo si la red era intensiva o densa (esto es cuando la cantidad

de vínculos observables es mayor que el promedio de los vínculos totales) se crea una gran red en la que todos los nodos están interconectados. De tal modo, que la mejor solución para representar este hecho, que además prácticamente es recurrente entre todos los sistemas, es presentar una red aleatoria, sin embargo, otros autores como Watts (1999) ha observado que a pesar de que esto es un hecho, la mayoría de los sistemas aunque estén interconectados presentan una formación de *clusters* y esto se presenta tanto para sistemas biológicos (como las redes neuronales), como sociales y artificiales (Internet o sistema de semáforos).

El principio de que las redes originalmente se pueden concebir como fenómenos aleatorios se debe al hecho de que es posible que todos los agentes se puedan vincular de algún modo. Por ejemplo, si en una reunión los agentes sólo conocen a los miembros del grupo al que pertenecen, entonces la reunión se presentará como un conjunto de pequeñas redes aisladas, sin embargo, si algún agente de cada una de las redes interrelaciona con otro u otros miembros de las otras redes entonces, en muy poco tiempo puede verse a ese sistema de redes como uno sólo, es decir, no es necesario que todos los asistentes a la reunión se conozcan para poder constituir la red en un sentido amplio. Siguiendo el ejemplo, si el anfitrión de la reunión quiere dar un anuncio para que todos se enteren, requeriría de avisarle, en el caso de redes aisladas, por lo menos a un miembro de cada uno de los grupos, y por el contrario, si la integración de la red más amplia se generará, entonces, tendría que darle el anuncio a muchos menos participantes que antes.

El hecho de que se generen estas redes, provoca que se geste el fenómeno conocido como "mundos pequeños"[26]. Dos son los ejemplos más conocidos de este fenómeno, el primero se refiere al llamado "seis grados de separación", esto es, la distancia que existe entre una persona y otra cualquiera en el planeta es de sólo seis personas más. Es decir, cualquier persona en el mundo, conoce a alguien que a su vez conoce a alguien, que conoce a alguien, etc., y así, se presume que no hay más de seis personas de diferencia entre cualesquiera dos personas. Sin embargo, aunque este hecho

[26] En español se suele decir, el mundo es un pañuelo cuando se hace referencia a este fenómeno, es decir, que se encuentren, por ejemplo, ligas entre personas que aparentemente no tenían relación alguna.

se ha demostrado que es falso en el sentido de número de personas[27] (Milgram, 1967), es cierto que se presenta el fenómeno de los "mundos pequeños".

El otro ejemplo, muy citado entre los estudiosos de las redes es el llamado "Oráculo de Bacon", esto es, cada actor estadounidense e incluso fuera de EU, tiene relación con el actor Kavin Bacon, convirtiéndose en el centro de universo fílmico. El oráculo funciona de la siguiente forma, si un actor participó en alguna película con Bacon, tiene el número 1, si otro actor nunca colaboró en una película con Bacon pero participó en una película con alguien que tenga el número 1 de Bacon, entonces tendrá el número 2 y así sucesivamente. Dando seguimiento a los repartos de cada una de las películas, se ha encontrado que aunque Bacon no es el centro del universo fílmico, pues hay actores que en promedio tienen un número menor[28] que él, el fenómeno de una alta relación entre un universo inmenso de actores existe.

Este fenómeno es el que determina la razón del porque Erdős y Rényi (1959) afirman que las redes tienen una composición aleatoria, puesto que si se crea un solo vínculo entre distintas redes, estas se integrarán rápidamente y por lo tanto, un factor aleatorio es el mejor modo de representarlas. Aunque en esencia esto es cierto, hay otros elementos que determinan la composición de las redes. Watts (1999) explica que se puede establecer un orden entre las redes incluso aunque se parta de la relación más simple que exista entre ellas, esto es, definiendo a una red con las siguientes características:

- **No dirigida:** Los vínculos no presentan direcciones inherentes entre los agentes, lo que implica que cada relación puede representarse como simétrica.
- **No ponderada:** Los vínculos no tiene asignada ninguna fuerza *a priori*, de tal modo que cada vínculo tiene la misma importancia.
- **Simple:** Los múltiples vínculos entre los nodos son eliminados, manteniendo sólo un tipo de relación.

[27] Milgram (1967) por medio del seguimiento que le dio a cartas, puedo demostrar que existían vínculos entre una gran cantidad de personas que no tenían aparentemente la más mínima relación en prácticamente todo Estados Unidos, aunque el promedio de los vínculos fue mayor que 6.

[28] Esto es, de la lista de agentes, se obtienen los números mínimos de pasos que existen entre cada uno y se promedia entre el total, de tal modo que alguien que tenga en promedio en número 1 significa que en promedio sólo hay un paso entre él y cualquier otro agente.

- **Poco densa:** Es decir, los vínculos son menores que el total de los agentes, es decir, no todos están conectados
- **Conectada:** Cada nodo puede ser alcanzado si se parte de cualquier otro seleccionado aleatoriamente.

La *no dirección* implica relaciones simétricas, es decir, no hay una jerarquía entre nodos, lo cual viola el principio de jerarquía de sistemas de Simon, mismo que no debe ser tomado con mucha preocupación puesto que como se verá más adelante, incorporar de nuevo el supuesto reforzará el argumento.

El que sea *no ponderada* significa que cada nodo tiene el mismo peso a lo largo de todo el sistema. Esto es similar a la idea de Holland de que la regla sólo adquiere su fuerza en su totalidad y no en sus partes, pero es contrario a la idea de Kauffman de que cada gen imprime un valor de aptitud. De nuevo no debe ser preocupante por la misma razón del punto anterior.

La *simpleza* de las relaciones es inicialmente un principio común de los autores revisados (Simon, 1973, Kauffman, 1993, Holland, 1996) pues mantienen el hecho de que la composición del sistema parte esencialmente de este tipo de relaciones con un solo vínculo y es justo en la dinámica de las propias interacciones y el éxito adaptativo de las combinaciones el modo en el que se genera la complejidad.

Que sea *poco densa* implica que no todos los agentes están relacionados y por lo tanto, describe una relación originalmente aleatoria, esto es consecuente con las ideas tanto de Simon (descomposición cercana) en el sentido de que las vinculaciones son más intensas entre las partes del componente al que pertenecen que entre las partes de los componentes a los que no pertenecen; como con las de Holland (bloques de construcción) puesto que es posible separar los elementos de la cadena binaria que forman las hipótesis y reordenarlas para crear un nuevo bloque, si las redes fueran muy densas no sería posible deconstruir la cadena puesto que cada elemento requeriría cambios en los otros reduciendo las posibilidades del significado de un bloque específico; y con las de Kauffman (variaciones en la vecindad) ya que el coeficiente K se encuentra entre 1 y N-1 indica el hecho de que cada nodo no está conectado con cada uno de los demás, sino sólo con sus vecinos y por lo tanto las variaciones de cada paquete genético, solo se realiza con cambios de un gen a la vez. Cabe señalar, que en este sentido, las nociones tanto de Simon como de Holland superan a las de Kauffman

puesto que en los dos primeros la densidad del sistema puede variar en tamaño y vinculación entre los componentes, es decir, los componentes pueden ser de distintos tamaños y la vinculación entre cada una de las partes que conforman cada componente a distintos niveles, mientras que en el caso de Kauffman es homogéneo para cada componentes, es decir, cada uno de los componentes tienen el mismo número de elementos y vinculados con la misma intensidad.

Y que esté *conectada*, implica que todos los agentes tienen por lo menos algún vínculo en la red, lo cual también está implícito en los ideas de Simon puesto que la jerarquía implica que de alguna forma cada parte está conectada con alguna otra en un componente; con las de Holland ya que la posibilidad de agregación y la formación de meta-agentes implica algún tipo de relación entre ellos; y con las de Kauffman puesto que mínimamente K vale 1 lo cual explícitamente indica que por lo menos existe un vínculo entre cada uno de los genes.

Partiendo de este esquema simple y aleatorio, Watts propone que las dinámicas de las redes, generan algún tipo de orden centrado. Esto es, en la dinámica de las redes pueden suceder dos fenómenos: 1) la creación o destrucción de vínculos entre los nodos y 2) la entrada y salida de agentes (nodos). Estos dos fenómenos, implican que la forma de la red, desde luego cambie, y esta forma por lo general resultará en la formación de *clusters*. Es decir, conforme pase el tiempo, habrá nodos y relaciones que sobrevivan a otras concentrando los vínculos en unos cuantos nodos, de tal modo que se crea una especie de orden. Es importante señalar, que no se presenta ningún elemento causal, más que el tiempo y es éste el que determina el resultado final, así, es una dinámica generada por la propia constitución (estructura) de la red y los cambios aleatorios que puede tener. Como se señaló arriba, los supuestos de a) no dirección y b) no ponderación son contrarias a las nociones de Simon para el primer caso y de Kauffman para el segundo, pero esto en lugar de contradecir las conclusiones de Watts las refuerza (formación de *clusters* y ordenamiento de sistema). Por lo tanto, además del tiempo, se pueden definir otras causas que determinen la concentración de las redes con modelos específicos a los problemas que se quieran estudiar. Para este estudio, esto se presentará en el cuarto capítulo.

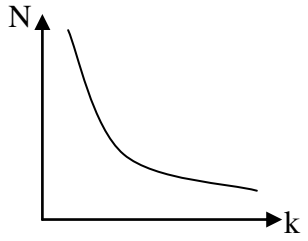
Barabási (2002) ejemplifica este fenómeno de concentración y orden con la exploración de la red de Internet. Esto es, descubrió por medio de un programa que

determina el número de *links* que existen en cada página web, que algunas tienen millones de interrelaciones, mientras que otras sólo algunas cuantas, por ejemplo, los buscadores como Google o Yahoo! concentran gran parte de los vínculos en la WWW. Y aún más importante, la existencia de este tipo de nodos -que llama centros neurálgicos (*hubs*)-, determinan la existencia de las redes, es decir, sin ellos la WWW estaría fragmentada o inconexa.

El hecho de que las redes se concentren en algunos nodos neurálgicos (*hubs*) no implica que sea permanente esta relación. Por el contrario, si hay condiciones favorables, nichos vacíos en términos de Holland, es posible que emerjan nuevos nodos que potencialmente se conviertan en centros neurálgicos. De nuevo el ejemplo de Yahoo! y Google muestra este hecho. En los primeros años de la gran difusión de la red, Yahoo! concentró la atención de los usuarios, sin embargo, Google haciendo algunas pequeñas variaciones en poco tiempo desplazó a la empresa dominante convirtiéndose ahora en el gran protagonista de las páginas web en el mundo.

Una forma de representar a las redes con centros neurálgicos es bajo una distribución de probabilidad tipo "ley de potencia". Esto es, una distribución en la que pocos nodos concentran muchos vínculos y muchos nodos cuentan con pocos vínculos. Esto se puede representar en la siguiente gráfica.[29]

Fig. 9. Representación de una distribución de probabilidad de tipo "Ley de potencia"



El hecho de que cambien estas relaciones implica también que las redes no necesariamente mantienen una fuerza permanente, de hecho, la propia existencia de

[29] Note que si todos los nodos tuvieran la misma cantidad de vínculos, la función de distribución sería una línea recta de 45º similar a la curva de Lorenz en el caso de perfecta equidad. Desde luego este hecho permite introducir el tema de la entropía, sin embargo, para los fines de esta investigación este tipo de distribución es suficiente.

centros neurálgicos representan un problema grave para la supervivencia del sistemas. Si por cualquier razón endógena o exógena desaparecieran estos centros, la red podría fragmentarse definitivamente.

En conclusión, todos estos principios de los sistemas complejos pueden ser utilizados para explicar procesos de innovación, pues como es evidente, contienen en esencia el factor de cambio en su propia constitución y funcionamiento. Como es también evidente, esta corriente de análisis matemático aún está en construcción y mucho de lo que pueda aplicarse en los distintos campos de investigación servirá para fortalecer la verificación de sus hipótesis. No existen consensos plenos en estos estudios pero si los suficientes para poder presentar explicaciones que otras corrientes de estudio económico no pueden hacer, en concreto: explicar el cambio económico cualitativo asociado a la innovación.

Es claro también que por su construcción, estas corrientes de estudio pueden servir como una base formal para describir tanto la forma de un producto como las posibles estrategias que pueden generar los distintos participantes del proceso de innovación para poder generar cambios. En el siguiente capítulo se presentarán algunos de los avances en este sentido.

CAPÍTULO 3. LOS SISTEMAS COMPLEJOS ADAPTABLES FRENTE A LOS TEMAS DE LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.

INTRODUCCIÓN.

Ya que hemos presentado un esquema más o menos general de lo que significa el análisis de los sistemas complejos, es necesario preguntarse si es pertinente aplicar este cuerpo analítico en la teoría de la innovación. Cabe señalar que ya existen trabajos al respecto, así, en primera instancia resumiré los avances que se han tenido en tres niveles distintos. El primero, respecto en la forma en la que se puede describir un producto o servicio por medio de la aplicación de la metáfora genética. El segundo, a propósito de su representación en términos del diseño que permite encontrar reglas para reducir los niveles de complejidad. Estos dos niveles los presentaré en términos de la literatura referente a la modularidad, que es la que mayor avance tiene respecto al uso de los sistemas complejos no sólo en un plano teórico, sino también aplicado en muchas empresas que tienen sistemas de producción con un alto nivel de complejidad. La estructura matemática implícita en esto será la aportada por Holland (1996). El tercer nivel será el de la propuesta de una teoría basada en la resolución de problemas, que permite observar que la estructura de la empresa está determinada, entre otras cosas, por el nivel de complejidad que requiera la resolución de sus problemas, en concreto los de innovación.

Una mezcla de estos tres niveles me permitirá contar con una estructura que vincule algunos de los principales temas de la literatura de la innovación revisados en el primer capítulo al nivel micro (que como se explicó es la principal área de avance) pero vista desde la perspectiva de la complejidad, utilizando como hilo conductor el parámetro K del modelo NK de Kauffman, (1993). Los temas que se vincularán son: la estructura organizacional, los mecanismos de coordinación por medio de contratos, las reglas, el aprendizaje, las capacidades, la proveeduría y la Taxonomía de Pavitt. Con ello se podrá mostrar la pertinencia del uso de las herramientas de la complejidad y servirá como base para la formalización que se realizará en el último capítulo. Se presentará un cuadro que resumirá los temas con el lenguaje utilizado tanto por Holland como por Kauffman y adicionalmente, se presentará un resumen de las aportaciones

sobre el tema de la difusión estudiado por David (1985, 2000) que contiene propiedades pertinentes para la formalización del modelo: el *path-dependece*, el fenómeno *lock-in* y *la no-ergodicidad*.

3.1. LA MODULARIDAD.

Para incorporar las herramientas metodológicas presentadas en el capítulo anterior se estudiará el caso de la modularidad puesto que se trata de un sistema de producción y diseño intermedio entre la producción de un bien simple y un sistema de producción integral de alta complejidad.

La modularidad es un mecanismo para controlar intencionalmente la complejidad que parte de la separación de los sistemas complejos en subsistemas más simples, es decir, en términos de Holland, crear bloques de construcción. Es una "*forma especial de diseño la cual crea intencionalmente un alto grado de independencia entre los diseños de componentes por especificaciones de interfaces de componentes estandarizados*" (Sanchez y Mahoney, 2003, p. 364). Baldwin y Clark definen a la modularidad como "*la construcción de un producto o proceso complejo desde pequeños subsistemas que pueden ser diseñados independientemente y funcionando aún juntos como un todo. Es una estrategia para organizar productos y procesos complejos eficientemente*". (Baldwin y Clark, 2000, p. 24)

Estas definiciones presentan las tres características fundamentales de la modularidad: 1) el carácter intencional (estrategia) para 2) simplificar los procesos y productos complejos, por medio de, 3) el diseño de subsistemas que actúan con autonomía pero siendo parte de un todo engarzado por interfaces de componentes.

Pueden mencionarse una gran cantidad de detalles sobre la modularidad, los dejo de lado por no ser el tema central, sin embargo, presento un esquema simple de la modularidad para retomar algunos conceptos básicos que serán utilizados más adelante. En este sentido es pertinente aclarar un par de puntos. Por un lado, la modularidad puede ser utilizada tanto en el diseño, como en la producción, y en el uso de los bienes, por lo tanto, no se pierde generalidad en cualquiera de los niveles en los que se utilice, y por otro lado, el criterio básico para la delimitación de un módulo es el de la *función* que desempeñe cualquier subsistema en el conjunto (Fixon, y Sako, 2001), esto es, la

relación que existe entre el componente (módulo) y la función que desempeña es fundamental para poder crear el subsistema independiente, esto es similar a la idea de que cada gen (o en su caso, un bloque de construcción) describa una característica específica.

Para ilustrar el sentido de la modularidad, pensemos, por ejemplo, en un producto relativamente simple pero que tienen distintos componentes: una bicicleta. El diseño de este bien puede ser separado en distintos componentes que cumplen con ciertas funciones, por ejemplo, su estructura (E) (manubrio, eje, soporte, tirantes, etc.), transmisión (T), llantas (L), pedales (P), rines (R), decoraciones (D), accesorios (A) (manijas, asiento, forro de los pedales, etc.) y frenos (F). Estos ocho componentes conforman el conjunto de la bicicleta y cada uno cumple con alguna función específica.[30]

Hay una gran cantidad de bicicletas (simples, para carreras, para montaña, etc.) sin embargo, todas tienen características (*parámetros de diseño*) similares que las hacen bicicletas y no otro bien (motocicletas o monociclos, por ejemplo) que forman la *arquitectura* del bien. "*Una arquitectura especifica qué módulos serán parte del sistema y cuáles serán sus funciones*" (Langlois, 1999, p. 7). Cada uno de los módulos en los que se pueden descomponer el producto puede ser diseñado –o producido– por agentes de forma independiente, manteniendo reglas fundamentales del producto que se esté haciendo (*reglas de diseño*) y que le den unicidad. Para poder ensamblar el producto, es necesario acordar parámetros fijos de las interfaces de forma estandarizada. Por ejemplo, se si piensa en diseñar una bicicleta para competencias olímpicas, los diseñadores de la estructura pensarán en materiales ligeros y resistentes así como dimensiones que reduzcan la fricción del aire y den estabilidad, los diseñadores de rines buscaran materiales y formas geométricas que permitan obtener ventajas en la competencia y los de llantas procuraran encontrar los materiales que tengan el mejor desempeño en la pista, la mayor tracción con la menor resistencia al piso, etc. Sin embargo, estos tres módulos para que puedan integrar un producto único y consistente deben fijar algunas reglas, por ejemplo, los tirantes de la bicicleta deben corresponder a las distancias del centro de los rines y deben ser ensamblados bajo reglas previamente

[30] Naturalmente, esto sólo es un esquema didáctico, y la descomposición puede ser distinta.

especificadas, así como las llantas con los rines. Estas fuertes (indispensables) relaciones de unión son las *interfaces* que deben estar ajustadas bajo *estándares* específicos para poder unir el rompecabezas del producto.

La ventaja de la modularidad radica en el hecho de que si se realizan algunas pequeñas variantes en el módulo, es posible realizar cambios de forma rápida y económica en ese nivel, aunque no así en el conjunto del producto. Estas ideas se pueden ver formalmente de la siguiente manera:

Sea x_i el parámetro de diseño i. El vector $\mathbf{x} = [x_i]$ donde $i = 1...N$, es el conjunto de parámetros de diseño necesario para describir completamente las características de un artefacto particular. De tal modo que el vector **x** es el espacio de diseño.[31] Una forma de caracterizar el diseño de un artefacto es como un "punto" en el espacio de diseño. Esto es, considerando todas las variantes que puede tener un producto, cada punto representa un bien específico. Esto en la metáfora genética es como decir, que un producto, en general, es un como un cromosoma y dependiendo los valores que tenga cada gen (alelo), se encuentra un bien específico. Es decir, un punto particular.

Si en vez de vector pensamos en una matriz ***X*** de parámetros de diseño y todas las posibles elecciones particulares de cada uno de los parámetros, el "punto" al que se refiere es más fácil de concebirlo.

Fig. 10. Matriz de diseño

$$X = \begin{bmatrix} az & am & \cdots & bl & gr \\ al & ac & \cdots & pl & me \\ 1.3 & 0.9 & \cdots & 1.1 & 1.2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \lambda & \mu & \cdots & \alpha & \tau \end{bmatrix}$$

Cada renglón es un parámetro de diseño (por ejemplo, color, en el primer renglón, material en el segundo, dimensiones en el tercero, etc.), y el valor en cada celda es la cualidad específica de ese parámetro (azul, metal, 1.1 metros, etc.). De tal modo

[31] $\mathbf{x} \subset \mathbf{R}^{Nx1}$ que es el espacio euclidiano $\mathbf{R}^N$ de dimensión N.

que cada columna es un diseño específico. Así, si existe una función F: $\mathbf{R}^{NxM} \rightarrow \mathbf{R}^{Nx1}$ cada columna se convierte en un "punto" de diseño específico[32]. Adicionalmente a esta representación, se pueden derivar tres características fundamentales: a) los parámetros de diseño tienen un rango de parámetro (la gama de colores, por ejemplo), b) el valor de un parámetro de diseño depende del valor específico de otro[33] (jerarquía) y c) en consecuencia la *invención* de un diseño es el cambio en el número de parámetros y la elección de los valores específicos (sus atributos y propiedades). Una invención radical es por lo tanto un cambio significativo en ambas características (parámetros y valores); una invención marginal de diseño es un cambio en la vecindad del punto. El proceso de diseño es un conjunto de acciones que "llena los vacíos" de las lista de parámetros de diseño. Esta representación nos será muy útil posteriormente.

El ordenamiento jerárquico de los parámetros de diseños nos permitirá construir las matrices de la estructura de diseño, donde cada *x* representa la relación que guarda un parámetro de diseño con otro, es decir, la decisión de optar por un parámetro específico incide sobre la elección de otro. Así, por ejemplo, si en un componente es necesario definir una manguera, esto implicará que se despliega un menú de las características de esa manguera (material, espesor, resistencia, etc.). Esto se reproduce en una matriz de tareas de diseño que es esencialmente isomorfa a la de parámetros de diseño (Eppinger, *et al*, 1993):

Fig. 11. Matriz de tareas de diseño

	1	2	⋯	*m*	*n*
1	•	*x*	*x*	*x*	*x*
2	*x*	•		*x*	*x*
⋮		*x*	•	*x*	
m	*x*	*x*		•	*x*
n	*x*		*x*	*x*	•

[32] Sea F:$\mathbf{R}^{NxM} \rightarrow R^{Nx1}$ definida por $F(s_i) = \mathbf{X}s_i$ donde s_i es un vector en R^{Nx1} que denota el valor de las características [s_1=(1,0,0,0,…0,0), s_2=(0,1,0,0,…0,0), s_3=(0,0,1,0,…,0,0),…, s_n=(0,0,0,0,…,0,1)]. De esta manera cada columna se convierte en un punto.

[33] Esto es compatible con la idea de la jerarquía de sistemas de Simon, retomado tanto por Holland, como por Kauffman.

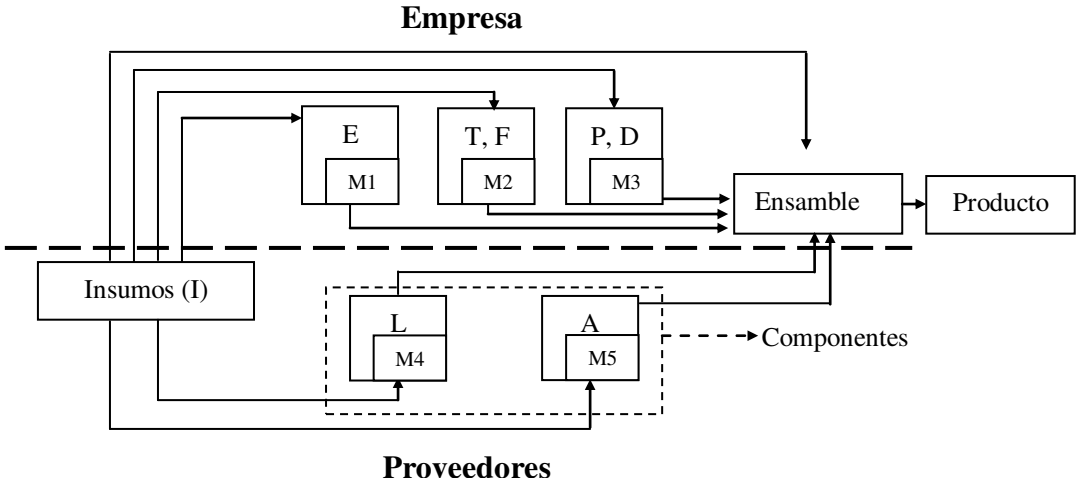
El reordenamiento de las tareas, permite construir módulos de diseño, es decir, espacios de diseño específicos para cada componente de tal modo que sólo algunas tareas estén perfectamente definidas mismas que se reflejan a su vez en parámetros de diseño específicos (estándares) que permitan la interconexión (interfaces) entre módulos.

Esta noción e ilustración de la modularidad basada principalmente en el trabajo de Baldwin y Clark (2000) para el caso del diseño, puede extenderse al de la producción sin perder generalidad. Así, por ejemplo, la representación más simple del proceso de producción de una empresa[34] en la que entran insumos que atraviesan por una caja negra para dar como resultado un producto:

Fig. 12. Representación simple de un proceso de producción

Se puede ver representada en forma modular, para nuestro ejemplo de la icicleta, del siguiente modo:

Fig. 13. Representación de un proceso de producción modular



[34] Entiendo por empresa al agente colectivo que *coordina* la previsión, diseño, producción o distribución de bienes y servicios demandados por otros agentes.

En esta representación, la empresa recibe insumos para alimentar a tres módulos (M1, M2, M3) que producen cinco componentes (E, T, F, P, D); dos de estos módulos producen dos componentes cada uno (M2 produce T y F; y M3 produce P y D), es decir, módulos de diseño independientes pueden convertirse en uno de producción y viceversa gracias a la aplicación de los *operadores modulares*, que más adelante se explicarán. Por otra parte, los proveedores se dividen en dos tipos, los proveedores de insumos y los proveedores de componentes que pueden pensarse como módulos independientes (en nuestro caso M4 y M5). La producción de cada módulo es independiente y sólo hasta el ensamblaje articulan el producto.

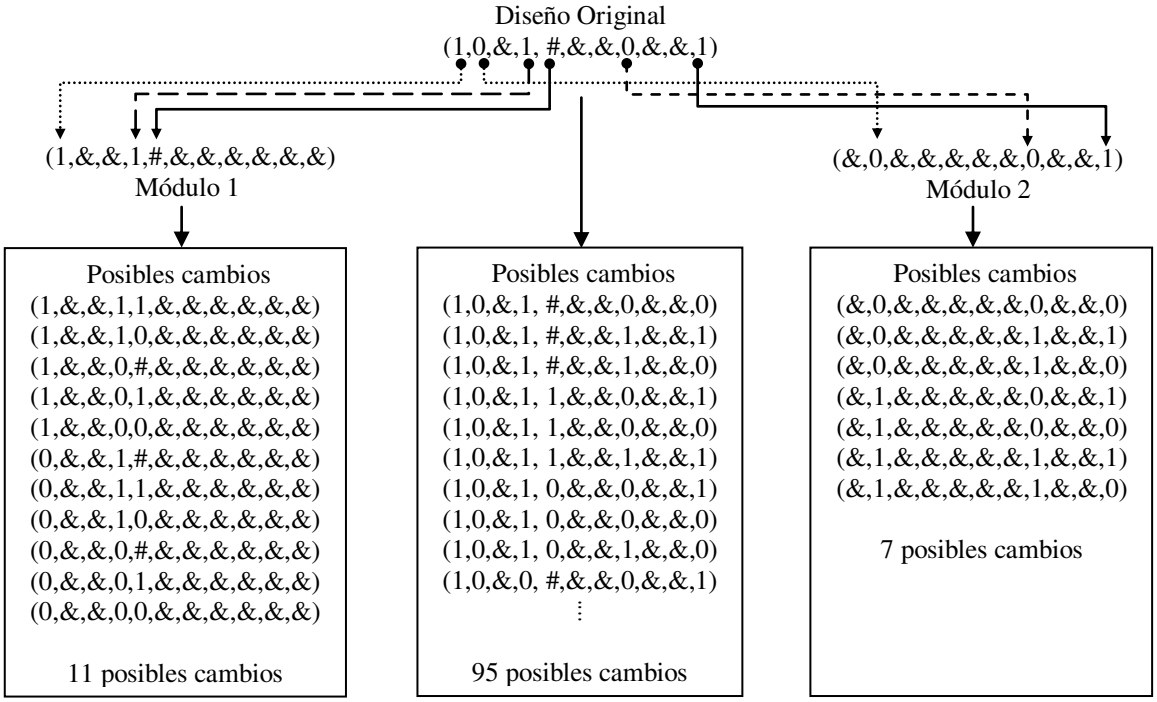
Esto es útil para presentar algunas ideas. Los módulos tanto de diseño como de producción no necesariamente tienen que ser los mismos. Además, un módulo puede transformarse en otro en cualquier fase por medio de los operadores modulares, a saber (Baldwin y Clark, 2000, Cap. 5):

1. Dividir (*splitting*) un sistema en dos o más módulos
2. Sustituir un módulo por otro
3. Aumentar un nuevo módulo a un sistema
4. Excluir un módulo del sistema
5. Invertir para crear nuevas reglas
6. Trasladar (*porting*) un módulo a otro sistema

Es fácil ver como estos operadores modulares pueden ser descritos por medio de la sintaxis que propone Holland y que se puede extender al modelo NK. Esto es, por ejemplo, si se describe al producto o diseño como (1,0,&,1, #,&,&,0,&,&,1), los posibles módulos serán todas las combinaciones de las posiciones que tengan contenidos (0,1,#), de tal modo que se pueden modificar tanto los valores como las posiciones por medio de los operadores creando con ello, nuevos bloques de construcción (módulos) por medio del uso de cualquiera de los operadores, ya sea tanto para la producción o el diseño (variaciones de las reglas) del bien. Así, por ejemplo, usando el operador de división (*splitting*), tendremos lo siguiente, (1,&,&,1,#,&,&,&,&,&,&) y (&,0,&,&,&,&,&,0,&,&,1) de tal modo que tendríamos

dos bloques de construcción (módulos) distintos derivados de uno original.[35] Los posibles cambios en los componentes del primer módulo resultante serán del orden de 11, considerando que el componente de la quinta posición (#) puede tomar tres estados (#,1,0) y para el segundo módulo las combinaciones posibles serían de 7. Si no se hiciera esta división en módulos las combinaciones resultantes de la descripción original tendrían 95 posibles estados, por lo tanto, se reduce el espacio de posibilidad de diseño (se simplifica) con las ventajas y desventajas que ello implica. El siguiente cuadro resume esta idea:

Fig. 14. Ejemplo de la aplicación del operador modular "Dividir"



Evidentemente, esto puede ser replicado para el resto de los operadores de tal modo que las combinaciones posibles presentan una estructura en la que, por un lado, la posibilidad de construir diferentes diseños se amplía y por el otro, el control a partir del reacomodo por módulos permite hacer cambios controlados y con menores costos.

[35] Note que la longitud de la descripción del producto o diseño (L en notación de Holland o N para la de Kaufman) es la misma, en nuestro caso 11 "genes". El símbolo & indica que se abstrae la relevancia de ese componente para la descripción por lo tanto arbitrariamente se pueden construir dos módulos que contienen los mismos 11 elementos.

Finalmente, se puede observar que cada módulo contiene al menos un componente que incorpora una función del sistema, aunque puede contener más de un componente. La secuencia es Componente→Módulo→(Ensamblaje)→Producto que corresponde a la noción básica de Agentes→(Agregación)→Meta-agentes propuesto por Holland (1996) para sistemas complejos adaptables o la jerarquía sistémica propuesta por Simon (1973).

Hasta aquí he propuesto algunas nociones básicas de la modularidad. Sin embargo, es pertinente señalar algunas de las ventajas que presenta para contrastarla con otros sistemas de producción. En la fase de diseño, la modularidad permite altos ahorros de tiempo y costos, puesto que se reducen las interacciones durante el proceso generado por el rediseño de la arquitectura entre los conceptos centrales del producto y los vínculos de los componentes. (Henderson y Clark, 1990, Bruseni y Prencipe, 1999, Baldwin y Clark, 2000, Ahmadi *et al*, 2001).

Por otro lado, en la fase de la producción, se presentan dos tipos de ventajas. La primera tiene que ver con la multiaplicación que puede tener un componente o módulo (*commonality*) (Baker *et al*, 1986, Collier, 1982, Desai *et al*, 2001, Sanchez y Mahoney, 2003). La modularidad permite que los componentes puedan cambiar relativamente rápido o hacer pequeños ajustes que permitan ser útiles o funcionales para distintos productos, es decir, un componente (desarrollado modularmente) puede ser utilizado en el funcionamiento de muchos productos distintos. En nuestro ejemplo, una misma transmisión puede ser utilizada para distintas bicicletas, usando el mismo componente (transmisión) o con ligeros cambios en él. Esta ventaja se manifiesta de dos formas, la primera tiene que ver con la reducción en los costos de inventarios y la segunda con la gran diversificación de productos que se pueden obtener[36].

La segunda ventaja en el nivel de la producción tiene que ver con la posibilidad de planear la producción de una forma más adecuada, permitiendo la reducción de tiempos y costos. En una producción de tipo modular, cada uno de los módulos produce independientemente a partir de un único plan, y es hasta la fase de ensamble en la que el producto final se concreta. A diferencia de una producción en línea, si alguno de los

[36] Recuerde por ejemplo, las grandes combinaciones que se podrían hacer con las distintas variable que se presentaron en el capitulo anterior. Un ejemplo de esto lo representa el Sony Walkman que con la constitución de sólo ocho módulos pudo desarrollar al menos 200 tipos distintos de productos (Sanchez y Mahoney, 2003)

pasos se detiene, la producción en su conjunto se detiene, lo que implica costos tanto de almacenaje como de recuperación de la inversión. Por ejemplo, si en la producción de nuestra bicicleta la secuencia lineal es de 10 pasos, y en el paso 7 se detiene la producción, por la falla de una máquina o el incumplimiento de algún proveedor, en los pasos 1 a 6 se acumulan acervos de productos incompletos (que implica costos de almacenamiento) y en los pasos 8 a 10, la producción es prácticamente nula. En una producción modular si se detiene la producción en alguna parte de un módulo, el resto sigue trabajando y es hasta la fase de ensamblaje que se manifestará el retraso (que será menor que en el de la producción en línea, a menos de que sea hasta el último paso) y los costos de almacenaje sólo serán una fracción menor del total de la producción (Baker *et al*, 1986). Esto es esencialmente similar al célebre ejemplo del relojero de Simon (1962)[37]. Por otro lado, la producción modular permite una planeación flexible que puede extenderse incluso hasta la última fase de proceso (*pospotment*) (Ernst y Kamrad, 2000, Feitzinger y Lee, 1997). Esto significa que en la producción se puede posponer la elección de algunos parámetros y la conformación específica de algún componente de tal modo que pueden reducirse problemas de incertidumbre respecto a la demanda. Por ejemplo, en la producción de nuestra bicicleta se descubre que algún tipo de decoración o color es preferido por los consumidores, entonces pueden cambiarse ligeramente algunos componentes de tal modo que la flexibilidad, no sólo se observa en la diversidad de productos sino en la facilidad de cambiar de uno a otro con bajos costos y reduciendo significativamente la incertidumbre con ello.

En resumen, la modularidad, en general, tiene las siguientes ventajas:

1. Reducción de diversos costos
2. Reducción de tiempos
3. Reducción de incertidumbre
4. Flexibilidad; y
5. Diversidad de productos (diferenciación)

Hasta este punto, parece pertinente el estudio de la modularidad por sus ventajas. Sin embargo, vale la pena explorar los problemas que presenta. Uno de ellos es que en

[37] Simon presenta un ejemplo similar, dos relojeros realizan sus actividades de distinta forma, uno comienza a hacer un reloj hasta que termina de hacer otro, por su parte, el otro relojero divide la producción en diez pasos para lotes de diez relojes, así, cuando hay interrupciones, el primer relojero detiene la producción de un reloj, mientras que el segundo detiene la producción de un décimo de reloj.

la modularidad las elecciones tomadas no necesariamente resultan ser las mejores. Para explicar esto, reproduciré de forma compacta los argumentos de Frenken, et al, (1999), Marengo, et al (2005), basados en el trabajo de Kauffman (1993) del modelo NK.

Frenken *et al*. (1998), presentan un estudio para analizar las interdependencias, la descomposición cercana y la adaptación con base en el modelo NK. Afirman que en los procesos complejos en los que participan las personas, en términos de estrategias, la selección ciega es evitable. De tal modo que el parámetro K propuesto por Kauffman (1993) puede ser superada por dos métodos para simplificar la complejidad, el primero es el que llaman Tamaño de Cobertura (*Cover Size*) y el Tamaño de Ascenso (*Ascent Size*). Esto es, en el primer caso (tamaño de cobertura), la relaciones epistáticas entre los elementos de lo que he llamado agentes pueden ser separadas manteniendo independencias entre unas y otras. Por ejemplo, una agente de tamaño $N = 12$ puede tener relaciones epistáticas máximas de $K = 11$ y mínimas de $K = 1$, y casos intermedios, sin embargo, los agentes pueden ser separados en cuatro bloques de tres elementos $D = \{[1,2,3,],[4,5,6],[7,8,9],[10, 11, 12]\}$ en los que cada bloque tiene una gran relación epistática en su interior y cada bloque con el resto, pero no cada elemento con el de otro bloque. En el segundo caso (tamaño de ascenso), presenta la idea de que las mutaciones (que pueden ser generadas por las personas) no tienen que ser de sólo en uno de los elementos a la vez, sino que pueden cambiar dos o más elementos simultáneamente de tal modo que se acelera el proceso de exploración. Esto, satisface el principio de descomposición cercana y con la debida abstracción esto claramente es consistente con la definición de modularidad.

A partir de la incorporación de estas modificaciones en el modelo de Kauffman (1993) realizan distintas pruebas (simulaciones) con seis tipos de descomposiciones para un $N = 12$ y 5 tipos de paisajes de eficacia biológica y descubren que sólo dos tipos de descomposición (de los 30 casos) la de cuatro bloques y la de perfecta descomposición (12 bloques) alcanzaron el máximo global. El primero con una lentitud significativamente superior al resto y el segundo con la población más pequeña de las clases. Con esto, se concluye que la modularidad padece de un problema de optimización contra velocidad. Esto es consistente con el planteamiento de Holland, en que se especificaba que en el diseño de las reglas por cruzamiento se reduce la complejidad pero se dejan de lado un conjunto de opciones que pueden tener mayor

fuerza y en caso de Kauffman es similar al problema de que los agentes (poblaciones) al alcanzar un máximo local no tiene opciones de alcanzar los globales.

En contraste con el sistema modular, el sistema integral que puede ser entendido como la máxima relación epistática (K=N-1 para cualquier caso) presenta un conjunto de problemas tanto en producción como en diseño que resultan ser significativos y que pueden resumirse en los siguientes puntos:

En el sistema de producción integral:

a) Los flujos de información pueden ser mayores, sin embargo, no necesariamente articulados por lo que se complica la toma de decisiones.
b) Pequeños cambios en el diseño y en la producción implican una serie de cambios en prácticamente todas las áreas por lo tanto, los costos tanto de coordinación como de implementación de las innovaciones son altos.
c) Si bien el espacio de posibilidades de innovación son mayores que en el sistema modular y existe la probabilidad de encontrar un máximo global, se requiere de una serie de condiciones adicionales para alcanzarlo (capacidades de aprendizaje, capacidades de innovación, una estructura de mercado adecuada, etc.).
d) Retrasos en el sistema de producción implica que se detenga todo el sistema por lo que genera mayores costos que en un sistema de producción modular.
e) Los cambios son en general más lentos.

Desde luego, el sistema de producción integral es un tipo ideal teórico, prácticamente todos los sistemas de producción pueden ser descompuestos en áreas, sin embargo, el grado de interacción y dependencia de un subsistema y otro es el que determina el grado de integración.

Ya que hemos presentado, por medio del ejemplo de la modularidad una forma de aplicación de los sistemas complejos en la descripción tanto de la producción como del diseño de productos conviene extenderlo al problema de la empresa, para ello, utilizaré la propuesta de Nickerson y Zenger (2004) sobre una teoría de la firma desde el enfoque de la solución de problemas.

3.2. LA TEORÍA DE LA FIRMA BASADA EN EL CONOCIMIENTO (LA PERSPECTIVA DE LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA)

Nickerson y Zenger (2004) presentan un modelo de la teoría de la firma basada en el conocimiento desde la perspectiva de la resolución del problema tecnológico. Usando el esquema de Kauffman (1993) y las ideas pioneras de Simon (1973) y las de Egidi y Marengo (2004) presentan tres casos a partir de la interacción de los elementos necesarios para solucionar un problema. Esto es, una baja interacción de los elementos necesarios para resolver el problema (en términos de Kauffman una relación epistática[38] baja o una K pequeña y en términos de Simon descomposición perfecta del problema); una interacción moderada de los elementos necesarios para resolver el problema (una K media o descomposición cercana); y una interacción alta, es decir una K máxima o no descomposición.

Ello trae como consecuencia que la solución de un problema sea distinta dependiendo de la complejidad del mismo, de tal modo que si el problema presenta una descomposición perfecta entonces la solución será directa o local, es decir, es un paisaje de adecuación[39] o de eficacia biológica relativamente plano, en otras palabras, son problemas que tienen una fácil solución o de una solución relativamente conocida. Por el contrario si no hay descomposición entonces el problema es altamente complejo y en lugar de presentar una solución directa o preconcebida, lo que se presentará en una propuesta heurística, es decir, los diseñadores, productores o ingenieros propondrán una serie de pasos por los cuales se podrá resolver el problema, estos pasos van desde el diseño de una estrategia de solución hasta la exploración de los campos necesarios para encontrar respuesta desconocida *ex ante*. En términos del paisaje de adecuación, significa que éste es muy rugoso y existe la posibilidad de ubicarse en un máximo local, es decir, encontrar una solución que no necesariamente sea la mejor. Finalmente, en el caso de la descomposición cercana el mecanismo de selección se presenta como una solución que combina tanto la búsqueda directa o local como una heurística, es decir, la solución se busca por medio de métodos probados y sobre campos de conocimiento

[38]Intensidad de la relación que se mantiene entre cada uno de los elementos de un agente.
[39] Un paisaje de adecuación (*fitness landscape*) se refiere a una representación gráfica similar a un terreno con valles y picos que representan las interconexiones cercanas (vecinas) y los niveles de adecuación (valores para el caso económico).

dominados por los especialistas. En el siguiente cuadro se representa este hecho, donde si el problema tiene una perfecta descomposición la solución se busca principalmente sobre conocimientos ya probados (marcado con ++), si el problema es tiene una descomposición cercana (es decir, problemas relativamente complejos) entonces la solución combina un conjunto de procedimientos para simplificar el problema y resolverlo a partir de conocimientos específicos (marcado con +) y si el problema es complejo o sin descomposición entonces la solución parte fundamentalmente de reglas de solución o heurísticas (marcado con ++) [40]:

Fig. 15. Selección de mecanismo por tipo de problema

Mecanismos de selección	**Perfecta descomposición**	**Descomposición cercana**	**Sin descomposición**
Búsqueda direccional	++	+	0
Búsqueda heurística	0	+	++

Esta graduación en el nivel de complejidad del problema basado en su posibilidad de descomposición, tiene distintas consecuencias que se analizarán en seguida siguiendo la ruta propuesta por los autores. Posteriormente se harán extensiones sobre los temas de la innovación.

Los problemas humanos (como la tecnología) sólo son resueltos por los propios humanos, de tal modo que quienes resuelvan los problemas altamente complejos, puesto que el problema no tienen descomposición, pueden contar con incentivos hacia el oportunismo que se manifiesta de dos formas, por un lado, utilizar la apropiación del conocimiento para aprovechar su ventaja, es decir, al ser poseedores de un conocimiento específico pretenderán ocultarlo parcialmente para poder explotar al máximo la búsqueda de una solución, y por el otro lado, buscarán que la heurística propuesta se acerque a su campo de conocimiento donde tendrán mayores ventajas. En ambos casos la probabilidad de encontrar una solución en un máximo local es mayor que la de encontrar una solución de máximo global. Estos incentivos se presentan también cuando hay una descomposición cercana del problema, sin embargo, la intensidad es menor.

[40] Retomado de Nickerson y Zenger (2004) p. 621

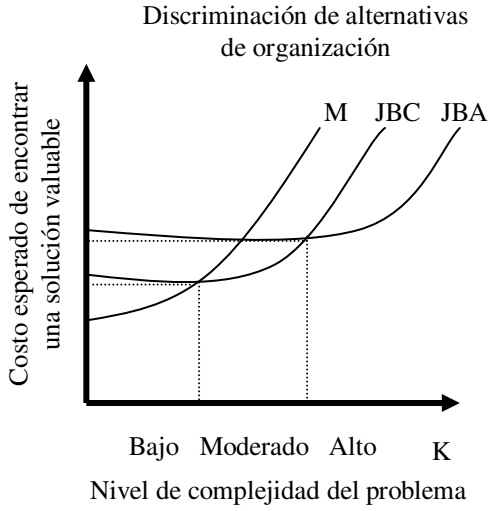
Este hecho genera costos adicionales y una forma para reducirlos es el tipo de organización que se elija para resolver el problema.

Así, los autores (Nickerson y Zenger, 2004) proponen tres formas de organización consecuentes con el nivel de complejidad del problema a resolver. Para el caso de la descomposición perfecta el mercado puede ser una estructura organizacional mucho más eficiente puesto que la solución se encuentra directamente en conocimientos ya probados, por lo tanto, la contratación directa de los poseedores de esos conocimientos o la compra de un bien (insumo o componente) que representa una solución para la empresa es la mejor opción porque prácticamente elimina los costos de investigación y desarrollo para las empresas, así como los producidos por el oportunismo de los diseñadores de soluciones. Para el caso en el que no hay una descomposición la forma es una jerarquía basada en la autoridad, es decir, una forma vertical de organización consistente con un sistema de producción integral en la que el conjunto de participantes de la solución cumplan con sus objetivos a partir de un plan integral (la heurística particular diseñada por la autoridad) y bajo el esquema de la concentración de la información y toma de decisiones por parte de una autoridad central (ya sea la dirección, la administración central o el Estado), esto por el hecho de que la solución por partes no es posible y en consecuencia la concentración es el mecanismo más apropiado, puesto que los costos por investigación y desarrollo se destinan específicamente en las áreas donde desde el centro se considera que son más adecuados reduciendo con ello la posibilidad de oportunismo. Y por último, para el caso de una descomposición cercana el tipo de organización más apropiado es la jerarquía basada en el consenso, que supone cierto grado de intereses y conocimientos compartidos entre los participantes de la solución y puesto que la posibilidad de resolver el problema por partes es factible, se puede generar un esquema simultáneo donde distintos equipos trabajan en paralelo y es en la reunión de las distintas representaciones de los equipos o unidades donde se consensan, a partir de los avances de cada unidad, las estrategias (heurísticas) que se utilizarán en general y en particular a partir de las condiciones de conocimiento de cada equipo; los costos en investigación y desarrollo se distribuyen entre las unidades y la posibilidad de oportunismo también se reduce puesto que a pesar de que existe una autonomía de las unidades, el monitoreo producto del consenso logra

minimizar el efecto negativo. Este modelo de organización es consistente con un sistema de tipo modular.

De esto se deduce que los criterios para determinar cada forma de organización dependen de a) los derechos de decisión sobre la trayectoria de la búsqueda de solución, b) los canales de comunicación para soportar la transferencia de conocimiento y c) los incentivos para motivar la búsqueda; y los costos asociados a los que se enfrentan las organizaciones son a) los propios de la investigación y desarrollo y b) los resultantes de la posibilidad de un oportunismo generado por la complejidad del problema. Esto se puede representar gráficamente de la siguiente forma[41]:

Fig. 16. Costos esperados para cada tipo de organización a partir del nivel de complejidad del problema.



En resumen, puesto que la especialización de un producto o servicio se vincula directamente con la complejidad de su diseño (la complejidad de la solución de problema que tiene incorporado) y esto, se presenta además como una cascada de problemas secundarios (jerarquías) entonces, la especialización de los elementos para resolverlo se presenta en todos los niveles (maquinaría, instrumentos, formas de medición, personal capacitado para resolverlos, división del trabajo, etc.) los cuales tienen costos incorporados. Así, si los niveles de descomposición del problema, como se explicó arriba, son graduales entonces, entre más complejo sea el problema significa

[41] Retomado de Nickerson y Zenger (2004) p. 627.

que la forma de solucionarlo pasa desde una búsqueda directa (o local) hasta una búsqueda heurística. Esto se refleja en la estructura organizativa adecuada para enfrentar esta búsqueda, que dados las posibles estrategias oportunistas que tengan los agentes quienes resuelven el problema y los costos de investigación y desarrollo incorporados, puede ir desde el mercado hasta una jerarquía basada en la autoridad. Esta perspectiva es consistente con una forma de producción, diseño y consumo que va desde el mercado, pasando por la modularidad y hasta un sistema integral. En la realidad, las organizaciones pueden presentar estructuras tipo ideal con estas características, sin embargo, esto no quiere decir que se manifiesten exclusivamente con alguna de estas, por el contrario, las grandes corporaciones muestran combinaciones coexistentes de los tres tipos.

La teoría de la firma vista desde esta perspectiva permite presentar una relación entre la naturaleza de los bienes (grado de complejidad) y la estructura organizacional para generar una innovación. Baldwin y Clark (2000) presentan por ejemplo esta relación en un esquema jerárquico donde, por un lado, existen estructuras para distintos niveles, ya sean sociales o artificiales (idea pionera de Simon), pero además existe una relación que desde los elementos más simples se construyen las relaciones más complejas determinado su forma. Esto es importante para las extensiones que presentaré al trabajo de Nickerson y Zenger a partir del análisis de distintos temas de la innovación.

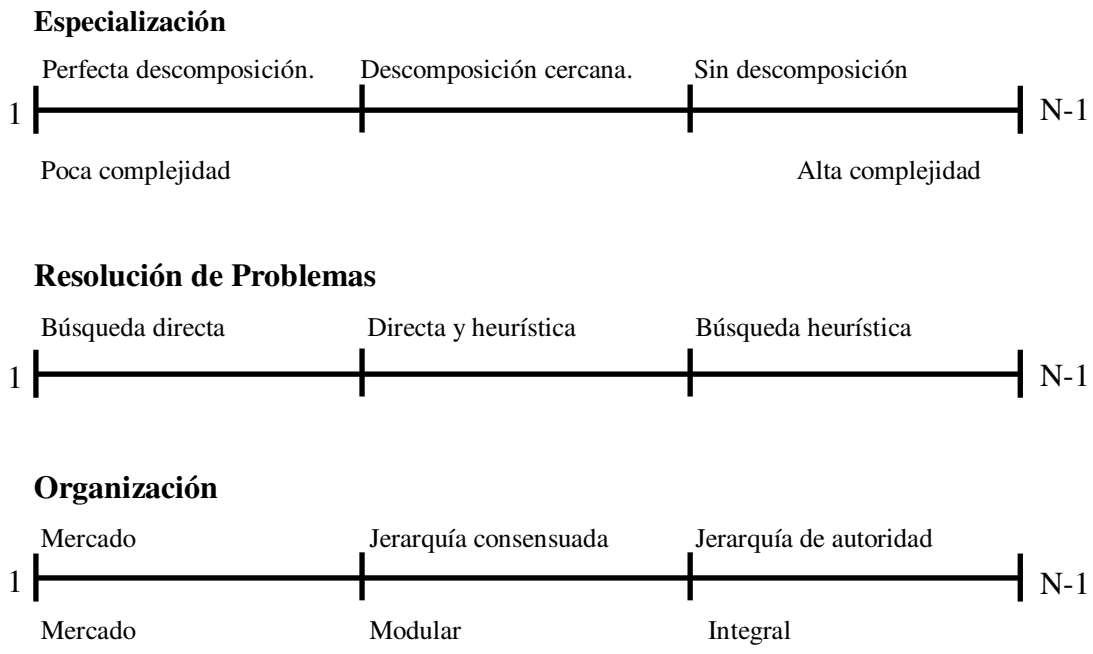
3.3. EL NIVEL DE COMPLEJIDAD Y LOS ELEMENTOS VINCULADOS A LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.

Ya que se ha mostrado un desarrollo organizacional a partir del nivel de complejidad del problema que tiene en su naturaleza un bien o servicio -visto desde su diseño o como una solución concreta[42]-, es posible considerar otros niveles tanto de

[42] Note que en la naturaleza de un artefacto se vinculan dos perspectivas de solución de problemas. Por un lado, el diseño del artefacto es un problema en sí mismo y por lo tanto, entre más complejo sea el artefacto el problema de su diseño también lo es. Y por otro lado, el artefacto es en sí mismo una solución, por lo tanto, entre más complejo sea el artefacto, *puede implicar* que resuelve un problema también complejo o un número amplio de problemas de distinta complejidad. Esta dualidad contenida en el artefacto es significativa puesto que enlaza a tres distintos sistemas: a) al de los diseñadores, b) al de los oferentes y c) al de los demandantes, lo cual configura una buena parte del sistema económico. En el siguiente capítulo esto podrá verse con más claridad.

relaciones como de agentes vinculados en el proceso de innovación a partir de la naturaleza y grado de complejidad de un bien. Por lo tanto, si pensamos en *K* como un índice que mida el grado de complejidad de un bien para el rango [1, N-1] según la notación de Kauffman podríamos presentar, a partir de lo descrito hasta ahora, el siguiente esquema.

Fig. 17. Nivel de complejidad frente a la especialización, a la selección de métodos de solución de problemas y la organización



Este tipo análisis puede extenderse a otros ámbitos de la innovación tecnológica en concreto a la formación y estructura de contratos, las reglas, el aprendizaje, las capacidades y la proveeduría.

3.3.1. Contratos

Las estructuras de contratos son dispositivos artificiales para procurar la coordinación entre los agentes. Ello significa que su diseño tiene el objetivo funcional de empatar o alinear las actividades de los agentes hacia acciones específicas y dependiendo el grado de complejidad del problema dicha estructura de contratos puede ser vinculada con este esquema de análisis según el grado de especialización del

producto que se trate (Milgrom y Roberts, 1993). Esta estructura contractual se encuentra determinada por los principios de coordinación bajo los cuales actúan los agentes participantes del proceso de solución de problemas, y que potencialmente, como se explicó arriba, en una economía capitalista pueden presentar problemas de oportunismo, ya sea por razones de riesgo moral o de selección adversa (anti-selección), de tal modo, que la estructura de contratos puede pasar desde la regulación por medio de los precios (mercado) o contratos clásicos hasta el diseño de contratos específicos o relacionales cruzando por contratos neoclásicos.

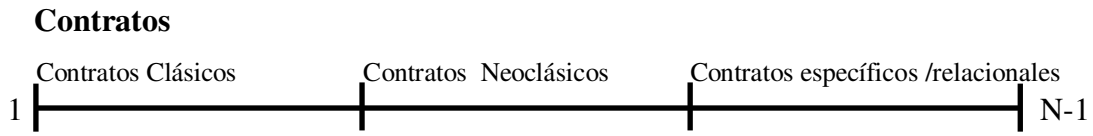
Esto es, si los problemas vinculados al diseño o producción de un producto son relativamente simples (un K bajo), entonces el mercado es un sistema de coordinación suficiente para resolverlo a partir de la compra de una solución ya sea materializada en un bien en la contratación estándar de un servicio temporal o permanente, en la estructura de contratos esto se realiza por medio de un contrato clásico (Williamson, 1979). Si el problema a resolver es muy complejo (una K cercana a N-1), la incertidumbre de las soluciones es amplia y por lo tanto no pueden diseñarse ni contratos estandarizados, ni contratos marco que permitan cierta flexibilidad, lo más que puede desarrollarse son contratos específicos basados tanto en objetivos como las reglas de operación de cada uno de los agentes que permitan generar una coordinación adecuada entre los mismos del tipo contratos relacionales (Williamson, 1979). Finalmente, si el problema mantienen un nivel de complejidad intermedio los tipos de contratos adecuados son los contratos marco o neoclásicos (Williamson, 1979), es decir, contratos que fijen los objetivos dejando con ello cierto grado de discrecionalidad por parte del proveedor de la solución. Desde luego, esta estructura de contratos se vuelve más costosa conforme aumenta el grado de complejidad, sin embargo, en una economía basada en la propiedad privada y la ganancia, resultaría más caro para el demandante del servicio o producto no contar con un acuerdo explícito que sea económica o jurídicamente penado (resultado de juegos de suma cero).

Es importante señalar que para el ámbito de la innovación tecnológica si bien los contratos son distintos: para la adquisición de un producto, para el diseño de un producto, para la transferencia de conocimiento o para la colaboración conjunta (contratos tipo relacional), la clasificación según el grado de complejidad (o si se gusta

el grado de especialización) se mantiene pues, el problema que resuelve el contrato es el de coordinación y la naturaleza de esta se encuentra en el problema concreto a resolver.

Así, la intuición de las jerarquías de estructuras de Baldwin y Clark (2000), pueden ahora presentar un criterio más específico de las relaciones (el del conocimiento necesario para resolver problemas desde una perspectiva de racionalidad limitada), entre las distintas estructuras. Sin embargo, es pertinente aclarar que esta jerarquía de estructuras se genera desde un proceso de *buttom-up*, es decir, los procesos de determinación no se encuentran en las partes más altas de las estructuras, sino en las más bajas, en este caso, en los problemas tecnológicos a resolver. El grafico que ilustra toda esta relación es el siguiente:

Fig. 18. Nivel de complejidad frente a la estructura de contratos



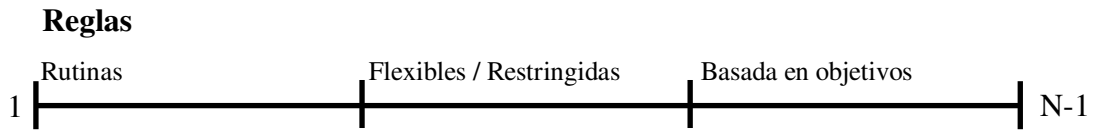
3.3.2. Reglas

Esta clasificación puede ser extendida a otro de los temas fundamentales de la innovación tecnológica, el de las rutinas. En una primera aproximación de la teoría evolucionista se parte del hecho de que en las organizaciones productivas siguen un conjunto de rutinas (secuencia de reglas procedimentales) que pueden ser similares a un genotipo, de tal modo que la innovación tecnológica emerge cuando hay cambios en estas rutinas, es decir, cambios en los insumos, procedimientos y formas de organización que repercuten en el producto. La literatura al respecto es amplia e iniciada por Nelson y Winter (1982). Si las rutinas son definidas como reglas de procedimiento y según las variaciones tanto del ambiente como de las propias rutinas, estas pueden describirse a partir del sistema de desempeño propuesto por Holland, es decir, las rutinas son una población de reglas que si son adecuadas para los objetivos previstos por las organizaciones a partir de sus modelos internos, entonces se mantienen hasta el grado de consolidarse incluso hasta volverse anquilosadas. Utilizar el esquema SI-

ENTONCES se convierte de una buena forma de modelar a la rutina[43], con la ventaja de que pueden explicar no solo las rutinas como reglas, sino además, las propias reglas de solución de problemas (meta-reglas), es decir, heurísticas.

Así, se puede extender este análisis para presentar una clasificación de las reglas, esto es, en problemas de solución simple las reglas son rutinas (rígidas por definición) y esto se debe a dos fuentes distintas e interconectadas, por un lado, la naturaleza del trabajo (se realizan trabajos repetitivos y estandarizados) y por el otro, los mecanismos contractuales (los contratos especifican funciones más que objetivos) que refuerzan el tipo de trabajo a desempeñar. Es el caso de un problema de descomposición cercana, las reglas para la solución de los problemas mantienen cierta flexibilidad, es decir, hay un espacio relativamente amplio para concebir una solución, pero restringida a ciertos principios técnicos (estándares, interfaces predeterminadas y áreas de investigación delimitadas)[44]. Por último, la noción de regla para un problema mucho más complejo se vuelve un tanto difusa, es decir, a pesar de que existan ciertos métodos generales y probados para resolver los problemas, la selección de los mismos implica un proceso poco rutinario, e incluso, frente a los resultados, parcialmente reversible (proceso homeoestático[45]), de tal modo que la regla para este caso está basada en objetivos. En consecuencia, las reglas cruzan por un espectro que va desde la rigidez hasta una alta flexibilidad. Esta perspectiva desde luego deja detrás a la literatura que considera a las rutinas como el elemento central para el análisis de la innovación, sus conclusiones no son equivocadas pero, son sólo válidas para problemas relativamente simples y basados en el marco del *learning-by-doing*. El resumen, las ideas de esta sección se pueden ver esquemáticamente en la siguiente figura:

Fig. 19. Nivel de complejidad frente a las reglas



[43] Es fácil ver ahora, que las rutinas pueden entenderse como las reglas de conducta que propone Holland.
[44] Esto es variaciones de una regla. En el caso del sistema modular, las rutinas cambian en función de las variaciones que estén ligadas al módulo.
[45] La homeostásis se refiere a la posibilidad que tienen los sistemas para retornar a un estado anterior al cambio si no se encuentra un mayor nivel de aptitud ante el mismo, esto sólo se puede hacer de forma local y si la relación epistática del gen que cambia es relativamente baja. (Barabási, 2002. Cap. 4)

3.3.3. Aprendizaje

En el proceso de ensayo y error al que se someten las reglas se presenta un proceso de aprendizaje en dos sentidos, el primero es que si al utilizar una regla y ésta resulta adecuada se mantiene en lo general (se *aprende* que esa regla es adecuada y sobrevive) y por el otro, la formación de esa regla implica un procedimiento, que al resultar adecuado puesto que la regla formada fue exitosa (sobrevivió) entonces, emerge una regla para la formación de reglas (meta-regla) (se *aprende* una regla para formar más reglas). Así, como se explicó en el capítulo primero desde que Freeman definió a la tecnología como conocimiento y es este la principal palanca para la innovación, los mecanismos de aprendizaje desempeñan un papel central puesto que son ellos los que permiten la acumulación dicho conocimiento. Por lo tanto, cada uno de los tipos de aprendizaje pueden entenderse como reglas para la formación de reglas (meta-reglas) y los resultados sobrevivientes como las soluciones (reglas) particulares que se aplican en el desempeño de las empresa. Desde la perspectiva que se ha utilizado en este trabajo, cabe preguntarse si existe una relación entre la complejidad que incorpora un problema y los distintos tipos de aprendizaje que se señalaron en el primer capítulo -aprendizaje por la interacción (*learning-by-interacting),* aprendizaje en la operación *(learning-by-operating),* aprendizaje debido al cambio *(learning from changing),* aprendizaje por la retroalimentación del sistema de desempeño *(system performance feedback),* aprendizaje por capacitación, *(learning through training),* aprendizaje por contratación, (*learning-by-hiring),* aprendizaje por medio de la búsqueda (l*earning-by-searching),* aprendizaje en la producción (*learning-by-producing),* y aprendizaje por la exploración *(learning-by-exploring).*

La respuesta es afirmativa, según sea la complejidad del problema se generan los distintos tipos de aprendizaje pero en distintos grados. Esto es, independientemente del nivel del problema, siempre existen *todos* los tipos de aprendizajes pero en mayor o menor medida, por ejemplo, el *learning-by-doing* es ubicuo, sin embargo, en los problemas con perfecta descomposición, este es el principal mecanismo de aprendizaje puesto que opera bajo un esquema rutinario; por el contrario, en problemas altamente complejos, el *learning-by-doing* se presenta en menor medida puesto que las actividades de cada uno de los agentes participantes son diversas. Así, en problemas complejos, no

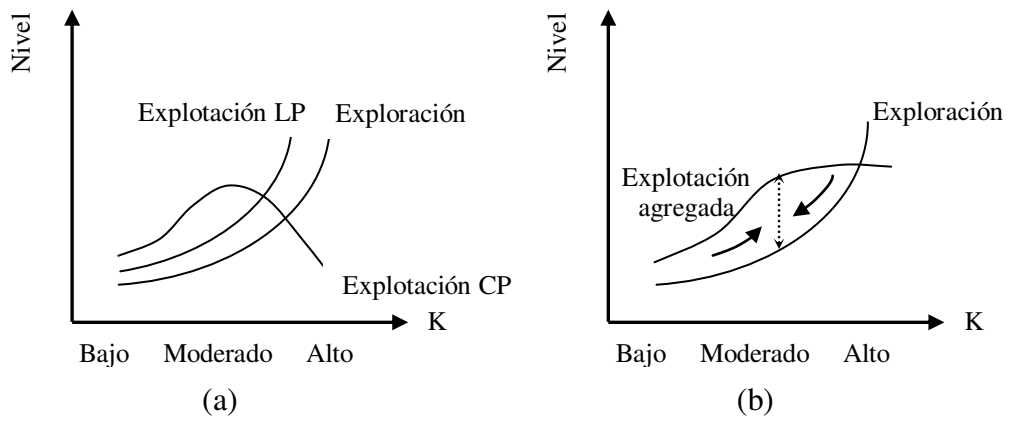
existe una fuente principal de aprendizaje sino, que en realidad se presenta una mezcla de todos los tipos de aprendizaje, que puede manifestarse, por ejemplo, con un centro estratégico de investigación y desarrollo multidisciplinario dentro de la empresa que tenga una fuerte relación con las distintas esferas de la misma (tanto en la producción como en la operación y en su vinculación con los proveedores) y con otros espacios de generación de conocimiento externos (universidades, proveedores especializados y usuarios) que le indiquen posibles pistas y métodos para solucionar el problema. Es fácil inferir que para el caso de un nivel de complejidad intermedio también se utilizará una mezcla de los distintos tipos de aprendizaje, sin embargo, no es posible determinar *a priori* los tipos más recurrentes y la intensidad de los mismos, pues esto depende de la naturaleza del bien y de la conformación de las distintas unidades que trabajan las partes del problema. Los que sí es posible afirmar es que la velocidad del aprendizaje, como resultado de la combinación de tanto la alta intensidad de las relaciones en el interior de la unidades como de la comunicación y parcial retroalimentación con las otras unidades, es mayor en los sistemas modulares que en los integrales, aunque los conocimientos generados no necesariamente sean de tipo radical. En conclusión, existe una relación entre la complejidad del problema a resolver y la combinación de aprendizajes que se generan. Gráficamente se puede representar de la siguiente forma:

Fig. 20. Nivel de complejidad frente a los tipos de aprendizajes.

Esto necesariamente nos conduce a la discusión del *trade-off* que existe entre la exploración y la explotación (March, 1991). Las conclusiones a las que llega March (1991) son consistentes con esta perspectiva, es decir, en un proceso adaptativo, la exploración es eficiente en el corto plazo, pero costosa en el largo. Así, cuando es alto el nivel de complejidad del problema o no hay descomposición, los niveles de exploración son altos y los de explotación son bajos e incluso negativos (se invierte *spot* más de lo que se obtiene) en el corto plazo, por lo tanto, es natural suponer que si los problemas

complejos generan pocas ganancias e incluso pérdidas no se invertirá mucho en la resolución de este tipo de problemas, sin embargo, las ganancias esperadas por la explotación futura (largo plazo) de la solución de un problema complejo son altas y se presentan de distintas formas: pago por regalías, ganancias por el desarrollo de un nuevo producto, ganancias por la diversificación de productos, ganancias por la solución de problemas similares, etc. Por el contrario, problemas simples presentan pocas ganancias, pues en términos de los mercados, se presentará abundancia de soluciones lo que representa una baja valorización de la respuesta. Es justo en los problemas con una descomposición cercana donde se pueden apreciar los mayores niveles de explotación que pueden deberse a las propias soluciones que se presenten dado el tipo de problema o por el resultado de las soluciones previas de problemas más complejos y que de alguna manera pueden ser capitalizados en términos de ganancias. Gráficamente se puede representar de la siguiente forma[46]:

Fig. 21. Nivel de complejidad frente a la explotación y la exploración



En el gráfico se muestra que la exploración es creciente conforme crece la complejidad del problema (a) y (b), mientras que la explotación de corto plazo (CP) es inicialmente ascendente conforme aumenta la complejidad del problema (pues el bien producido es cada vez más especializado y por lo tanto el valor que genera es mayor y el número de competidores menor), sin embargo, si el problema es muy complejo la explotación en el corto plazo (CP) es baja puesto que por un lado el número de usuarios es bajo y los niveles de inversión altos (a). Sin embargo, en el largo plazo (LP), el nivel

[46] Elaboración propia con base en March (1991)

de explotación es ascendente conforme aumenta la complejidad, puesto que la difusión de la solución que se presenta se amplía entre los usuarios (demandantes) y simultáneamente se generan ganancias extraordinarias debido los desarrollos secundarios de la solución, el monopolio del producto ofrecido, las regalías, las consultorías, etc. (a). Así, si se agregan tanto las curvas de explotación de corto como de largo plazo (b), se obtiene una curva de explotación agregada en la que se puede observar que si se asocian costos directos a la exploración (costos por la I&D), se crea una brecha de beneficios extraordinarios que encuentra su mayor nivel en productos de tipo de problemas de descomposición cercana, representada por la línea punteada en (b). Ello podría ser una razón para que los proveedores de soluciones de problemas complejos busquen en la modularización un mecanismo no sólo para resolver el problema, sino además, para aumentar los beneficios esperados de la organización, y por otro lado, esto también crea incentivos para que los oferentes de bienes que representan soluciones simples, busque generar un mayor valor agregado proveyendo a sus bienes con elementos más sofisticados que satisfagan una demanda más amplia. Esto es consecuente con la hipótesis de Kauffman (1993) de que en los sistemas de mediana complejidad se encuentran la mayor diversidad y nivel de aptitud.

3.3.4. Capacidades

Además de lo anterior, la literatura de la teoría del aprendizaje, nos conduce a dos temas clave en el estudio de la innovación tecnológica, por un lado se encuentra el tema de la capacidades y por el otro, el estudio del aprendizaje por medio de las relaciones proveedor-usuario. Al respecto, en primer lugar se presentará una síntesis de la literatura de las capacidades para observar la consistencia que se presenta frente al enfoque de los sistemas complejos. Después se presentará una revisión que tiene que ver con las relaciones proveedor-usuario, que servirá de introducción al problema de la proveeduría.

Un enfoque que se desarrolló a partir de los aprendizajes es el de las capacidades (Bell, 1984). Esto es, en el proceso de aprendizaje las empresas crean capacidades (reglas y procedimientos para resolver problemas tipo recurrentes) que son clave para la

innovación. La literatura sobre las capacidades (también llamadas competencias) es vasta y puede ser agrupada en cuatro dimensiones:

a) *Capacidades de producción*. Tienen que ver con las posibilidades que tienen las empresas para producir, es decir, las capacidades de usar las técnicas de producción existentes (Bell y Pavitt, 1995). En esta dimensión se encuentran las capacidades básicas de la empresa que se vinculan tanto con dominio de los elementos técnicos y competitivos básicos. El análisis típico de la Organización Industrial se encuentra en este nivel.

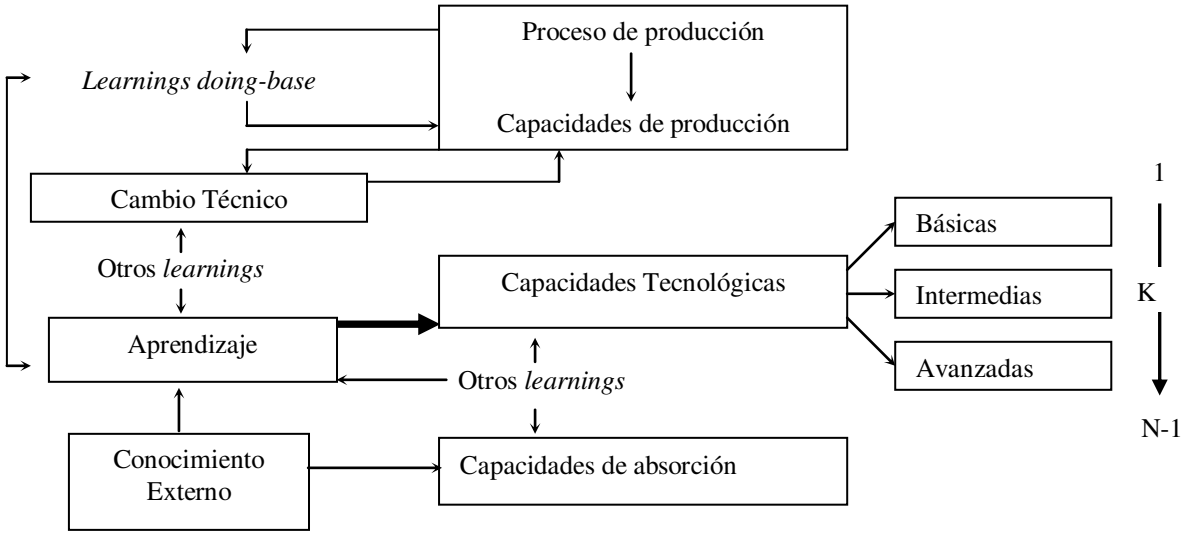
b) *Capacidades tecnológicas*. Esta segunda dimensión se refiere a las condiciones por medio de las cuales las empresas pueden administrar y generar conocimiento de forma interna, es decir, las capacidades para generar y administrar el cambio técnico (Bell y Pavitt, 1995) Esta dimensión implica diferencias entre los sectores (Bell y Pavitt, 1995) y la incorporación de distintos niveles tanto de profundidad como de proceso (Lall, 1993).

c) *Capacidades de absorción*. Esta tercera dimensión se refiere principalmente a las capacidades que tienen las empresas para poder adaptarse a los cambios tecnológicos externos. Esto es por medio de la transferencia tecnológica. (Cohen y Lenvinthal, 1990)

d) *Capacidades dinámicas*. Las capacidades dinámicas es una dimensión en la que las empresas tienen la capacidad de adaptarse (cambiar, ajustarse, adecuarse, o ser sujeta de selección) ante cambios en el exterior, es decir, la habilidad de la empresa para integrar, construir y reconfigurar competencias internas y externas para responder rápidamente ante los cambios en el ambiente (Teece y Pisano, 1994). Estas capacidades son las que permitirán obtener mayores ventajas y son esencialmente deliberadas pues tienen implícita y explícitamente un carácter estratégico.

La relación entre el aprendizaje y las tres primeras capacidades se puede observar en la siguiente figura:

Fig. 22. Esquema de relación entre aprendizajes y capacidades[47]



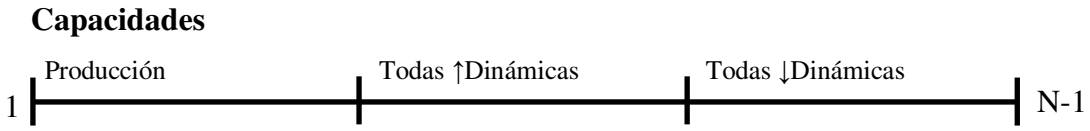
Es importante resaltar que en este esquema el aprendizaje es centro del incremento de cada una de las capacidades y de hecho, las capacidades dinámicas se pueden encontrar dentro o fuera de cada una de las otras capacidades. Siguiendo nuestro esquema teórico podríamos entonces definir a las capacidades como un subsistema dentro de la empresa que se compone de recursos humanos, de capital y de conocimiento (tácito y explicito) entendido éste como la acumulación de aprendizajes tanto de soluciones específicas (reglas y rutinas o habilidades formadas a partir de ellas) a problemas de distinto nivel de complejidad como de reglas para encontrar dichas soluciones (meta-reglas) que respondan adecuadamente en un espacio y tiempo específico y que forma el ambiente de la empresa. Las distintas configuraciones, a partir de los tipos, magnitudes y relaciones, de estos cuatro elementos (recursos humanos, de capital, reglas y meta-reglas) forman las distintas capacidades de la empresa.

Naturalmente, las conclusiones a las que ha llegado la literatura del aprendizaje, como se explicó arriba, es consistente con el de perspectiva de la solución de problemas complejos, de tal modo que la complejidad del problema a resolver determinará el grado y tipo de aprendizaje que se genere en la organización y desde luego, dada la combinación e intensidad de *learnings* que se produzcan repercutirán en el incremento de las capacidades (principalmente tecnológicas) de la organización. De tal modo que

[47] Elaboración propia a partir de Bell (1984) , Bell y Pavitt (1995), Cohen y Levinthal (1990), Lall (1993) y Teece y Pisano (1994).

según sea el grado de complejidad del problema, las capacidades pertinentes serán distintas donde, para problemas de perfecta descomposición, las principales capacidades serán las de producción y las tecnológicas básicas, para problemas sin descomposición la mezcla de las capacidades tanto de producción, como de absorción y tecnológicas altas serán las que dominen con una componente de capacidades dinámicas de menor intensidad y para problemas de descomposición cercana las capacidades serán un mezcla más equilibrada. Según nuestro esquema ilustrativo:

Fig. 23. Nivel de complejidad frente al tipo de capacidades



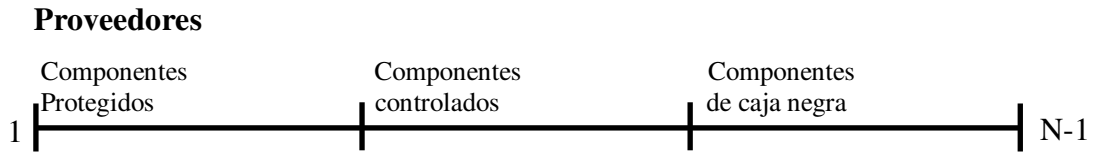
3.3.5. Proveeduría

Ahora bien, como se mencionó en el primer capítulo, uno de los principales enfoques desarrollados a partir del aprendizaje es el de la relación proveedor-usuario (Lundvall, 1992), esta relación puede tener dos direcciones desde el punto de vista de las empresas, por un lado, lo que puede aprender la empresa como usuario de los bienes y servicios de sus proveedores y por el otro, lo que puede aprender a partir de sus consumidores. De la primera relación la empresa puede aprender desde elementos técnicos hasta heurísticas y de la segunda relación nuevas aplicaciones de sus productos e identificar otras necesidades. Ello implica necesariamente que para que una empresa sea innovadora las funciones que realizan los distintos departamentos estén lo suficientemente integrados para aprovechar este aprendizaje provisto del exterior.

Si bien existe esta dicotomía de la relación proveedor-usuario (hacia adelante con los consumidores y hacia atrás con los proveedores), el aprendizaje generado por la proveeduría es el tema en el que nos centraremos puesto que es una fuente mucho más amplia y especializada de generación de conocimiento que del lado de los consumidores (sobre todo si son finales). La estructura de los proveedores es distinta según el tipo de descomposición que presente el problema, de tal modo, que según la clasificación de Cusumano y Takeishi (1991), los proveedores pueden ser aquellos de partes protegidas

del proveedor (*supplier proprietary parts*), de partes controladas al detalle (*detail-controlled parts*) y partes de caja negra (*black-box parts*). En el primer caso, los proveedores mantienen una relación de plena autonomía tanto del diseño como de la propiedad de sus productos, los que se vinculan con un problema simple; en el segundo caso, existe una autonomía relativa, es decir, hay restricciones tanto de diseño como de propiedad aunque con una cierta autonomía, similar a lo que sucede en un sistema modular consecuente con un problema de descomposición cercana; y finalmente, en el tercer caso, existen altas restricciones, tanto de diseño como de propiedad, lo cual también es compatible con la jerarquía basada en la autoridad y derechos de propiedad detallados (contratos específicos) para el caso de problemas de una naturaleza altamente compleja. Desde luego los circuitos de aprendizaje (y el conocimiento derivado) a partir de esta jerarquía son distintos según el grado de complejidad. Esquemáticamente:

Fig. 24. Nivel de complejidad frente al tipo de proveeduría



3.3.6. Taxonomía de Pavitt

Esta perspectiva tiene además una vinculación significativa con el estudio clásico de Pavitt (1984) sobre los sectores tecnológicos. En las últimas versiones que escribió, Pavitt presentó cinco tipos de sectores con ciertas características que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Taxonomía de Pavitt[48]

Características	***Dominado por la proveeduría***	***Intensivo en escala***	***Intensivo en información***	***Basado en ciencia***	***Proveeduría especializada***
Principal foco de actividades tecnológicas	Reducción de costos	Combinado	Combinado	Combinado	Mejora de producto
Principales fuetes de acumulación tecnológica	*Proveedores*, aprendizaje en la producción, anuncio de servicios	*Producción de ingeniería*, aprendizaje en la producción, proveedores, diseño	*Software corporativo y sistema de ingeniería*, equipo y proveedores de software	*I&D corporativa*, investigación básica, producción, ingeniería, diseño	*Diseño y desarrollo (usuarios avanzados)*
Principales direcciones de acumulación tecnológica	Tecnología en procesos y equipo relacionado (Hacia arriba)	Tecnología en procesos y equipo relacionado (Hacia arriba)	Tecnología en procesos y software relacionado (Combinado)	Productos de tecnología relacionada (Concéntrica)	Mejora en productos (Concéntrica)
Principales canales de imitación y transferencia tecnológica	Gasto en equipo y servicios relacionados	Gasto en equipo, know-how, licencias, capacitación relacionada, ingeniería de reversa	Gasto en equipo y software, ingeniería de reversas	Ingeniería reservada, I&D, contratación de ingenieros y científicos con experiencia	Ingeniería reservada , aprendizaje de usuarios avanzados
Principales tareas estratégicas gerenciales	Uso de tecnología de donde sea para reforzar otras ventajas competitivas	Integración incremental de nuevas tecnologías en sistemas complejos, mejora y difusión de las mejores prácticas, explotación de tecnologías de procesos avanzadas	Diseño y operación de sistemas complejos de procesamiento de información, desarrollo de productos relacionados	Desarrollo de productos relacionados, explotación de la ciencia básica, activos complementarios, reconfiguaración de responsabilidades divisionales	Monitoreo de las necesidades de los usuarios avanzados, integración de nuevas tecnologías en productos

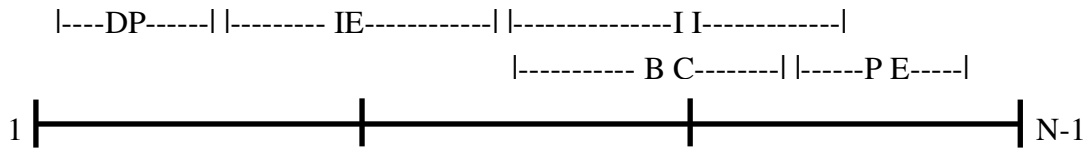
Aquí se puede observar que el sector dominado por la proveeduría y parte del intensivo en escala, entra dentro del rango de problemas simples y descomposición cercana, dada la naturaleza del trabajo que desempeñan; por otro lado, parte del sector intensivo en escala, parte del sector intensivo en información y parte del basado en ciencia, se encuentran en el rango de problemas de descomposición cercana; y finalmente, parte del sector intensivo en información, parte del basado en ciencia y el de

[48] Reproducido de (Pavitt, 1984) p. 360. Traducción propia.

proveeduría especializada, se encuentran dentro del rango de problemas con alta complejidad. De tal modo que esta perspectiva también es útil para analizar en términos de la Taxonomía de Pavitt. Gráficamente:

Fig. 25. Nivel de complejidad frente a la Taxonomía de Pavitt

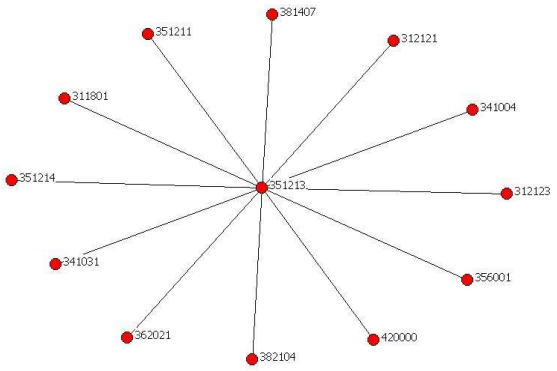
Taxonomía de Pavitt



Por otro lado, esta relación de proveedor-usuario así como el desarrollo de los modelos *buttom-up*, y el enfoque basado en redes, permite extender esta relación según el nivel de la complejidad. Esto es, las innovaciones son el resultado de las interacciones de los distintos agentes que participan en el proceso de innovación, por tanto desde esta perspectiva la innovación está en función de la cantidad de agentes que participan en el sistema, el tipo de agentes de los que se trate, las cantidades de relaciones que tengan cada uno, su tipo de relación, los flujos de comunicación, el tipo de comunicación que establezca y las relaciones que tengan los agentes con otros agentes distintos a los del sistema (externos). Si bien se ha determinado que para cada nivel de complejidad hay un cierto tipo de proveedores, entonces cabe preguntarse cuáles son las relaciones que estos mantienen a partir del enfoque de la solución de problemas complejos. Esto es, preguntarse si la complejidad del producto que se vincula directamente con la complejidad de la empresa, puede extenderse a la relación entre las empresas proveedoras a lo largo de la cadena de producción. Así, si presentamos de nuevo a un producto, como una descripción de sus componentes y la complejidad de la relación de eso componentes a partir del coeficiente *K*, podemos deducir que las empresas que realizan productos simples, se concentran en redes relativamente simples, mientras que empresas que realizan productos más complejos, se incluyen en redes también más complejas con estructuras variadas. De tal modo que, el grado de complejidad de un producto se proyecta sobre el tipo de red a la que pertenece la

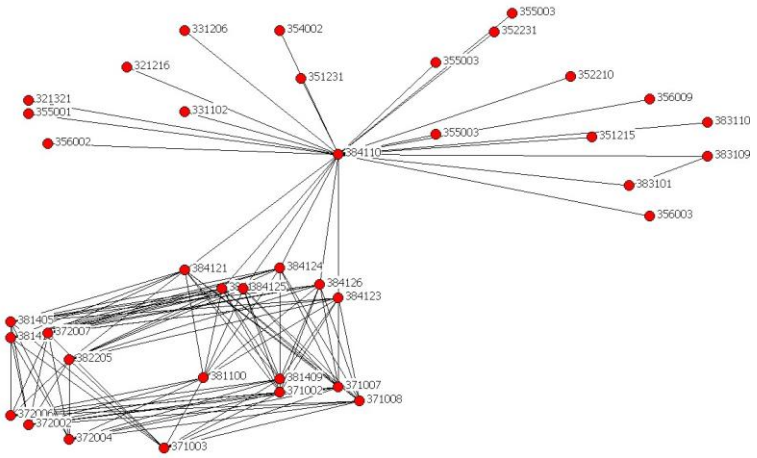
empresa que realiza dicho bien. Para ilustrar esto conviene presentar el esquema de la cadena productiva de dos productos uno simple (refrescos) y otro complejo (automóviles). Los resultados se presentan en las siguientes gráficas.[49]

Fig. 26. Cadena productiva de refrescos



Como se puede observar, esta industria tiene una red de proveedores relativamente simple, en el que la empresa productora de refrescos concentra todas las relaciones. Mientras que, como se puede observar en la gráfica posterior, la producción de un bien complejo, no sólo representa la inclusión de más proveedores, y una cadena más larga, sino que las interacciones entre ellos son mucho mayores. Por lo tanto, la naturaleza del producto determina el tipo de red en la que se inserta la empresa que lo produce.

Fig. 27. Cadena productiva de Automóviles



[49] Ambas redes se construyeron con base en los esquemas de cadenas productivas desarrollados por el SIEM.

Todos estos temas vinculados con la innovación tecnológica ponen a debate las formas organizativas de la producción, es decir, qué es más conveniente: un sistema modular que reduzca costos y promueva la diversidad de los productos o uno integral que pueda aprovechar las ventajas de la relación proveedor usuario aunque sea más costoso y lento. Una posible respuesta que se puede desprender a partir del enfoque que hemos usado es que la opción adecuada para la estructura de la organización está en función de la complejidad del problema. De tal modo que si se trata de un problema sin descomposición (en términos de Fixon y Sako (2001) no hay relación directa y única entre la función y componente) entonces, convendrá apostar por procesos de tipo integral pero, procurando (al ya tener una solución más o menos adecuada) buscar procesos de estandarización de tal forma que en la búsqueda de soluciones secundarias el sistema, con el tiempo, se transforme parcialmente o totalmente en uno de tipo modular. Esto es relevante porque podría suponerse que de un sistema simple se pasa a uno modular para llegar a uno integral, nada más lejano de la realidad.

Un sistema simple se vuelve cada vez más complejo según su crecimiento (participación de nuevos agentes y relaciones) hasta llegar a un tamaño tal que puede utilizar la estrategia de la modularidad, sin embargo, esta estrategia por todas las razones arriba mencionadas puede ser utilizada o no dependiendo de las condiciones de la naturaleza del producto que realiza la empresa y de la evaluación que realicen los directivos de la empresa a partir del sistema de asignación de crédito y de sus modelos internos.

Todo lo reflexionado hasta este momento puede resumirse en el siguiente cuadro:

Tabla 3. Esquema de la relación entre el nivel de complejidad y los distintos ámbitos de la teoría de la innovación a partir de las notaciones de Holland y Kuaffman.

Ámbito de la innovación tecnológica	Nivel de complejidad según Kauffman					
	K=1	Notación de Holland	1<K<N-1	Notación de Holland	N-1	Notación según Holland
Descomposición	Perfecta descomposición	Bloques de construcción	Descomposición cercana	Bloques de construcción	Sin descomposición	Sin bloques de construcción
Resolución de problemas	Búsqueda directa	Sistema de desempeño simple basado en reglas SI-ENTONCES	Directa / Heurística	Sistema de desempeño basado en reglas y meta-reglas SI-ENTONCES	Heurística	Sistema de desempeño basado en meta-reglas SI-ENTONCES
Organización	Mercado / Simple	Sistema Adaptable	Jerarquía consensuada / Modular	Sistema Complejo Adaptable	Jerarquía de autoridad / Integral	Sistema Complejo Adaptable
Contratos	Mercado/ Clásicos	Sistema de desempeño simple basado en reglas SI-ENTONCES	Contratos Marco / Neoclásicos	Sistema de desempeño basado en reglas y meta-reglas SI-ENTONCES	Contratos específicos / relacionales	Sistema de desempeño basado en reglas SI-ENTONCES
Reglas	Rutinas	Reglas	Flexibles/ Restringidas	Reglas / Meta-reglas	Basada en objetivos	Meta-reglas
Aprendizaje	*Learning by doing* / Diversos	Meta-regla simple	Diversos	Meta-reglas	Diversos / I&D	Meta-reglas
Capacidades	Producción	Agentes/ Flujos/Reglas /Meta-reglas Sistema de desempeño simple	Todas / Altas capacidades dinámicas	Agentes/ Flujos/Reglas /Meta-reglas / Sistema de desempeño complejo	Todas / Bajas capacidades dinámicas	Agentes/ Flujos/Reglas/Meta-reglas / Sistema de desempeño complejo
Proveedores	Componentes protegidos	Agentes	Componentes controlados	Agentes / Diversidad	Componentes de caja negra	Meta-agentes
Sectores Tecnológicos	DP/IE	Sistema Adaptable	II/BC	Sistema Complejo Adaptable	BC/PE	Sistema Complejo Adaptable
Red de proveedores	Pocos / Simple	Agentes / Flujos	Variados / Poco densa	Meta-agentes / Flujos	Variados / Intensiva	Meta-agentes / Flujos

3.4. DIFUSIÓN TECNOLÓGICA.

Finalmente, es conveniente señalar que el enfoque de la solución del problema puede explicar algunos elementos adicionales como el *path-dependence*, el cual será un elemento fundamental para el siguiente capítulo.

La generación de un nuevo producto o tecnología genera un proceso de descubrimiento tecnológico dialéctico. Por un lado, encontrar la solución de un problema, por ejemplo un nuevo producto, genera un conocimiento para su dominio de tal modo que al paso del tiempo se vuelve cada vez más sencillo, sin embargo, parte del conocimiento generado en la solución de ese problema puede dar luces para la solución de otro más complejo de tal modo que como afirma Holland la adaptación genera complejidad. Así, se genera novedad pero ajustado a la historia y condiciones del entorno tecnológico.

Este fenómeno es descrito, aunque bajo otro mecanismo, por P. David (1989) en el que detalla el proceso de difusión por medio de la competencia tecnológica. Esto es, dos o más tecnologías nuevas pueden competir por imponerse (vapor, gasolina o electricidad como fuentes de energía para el automóvil, los sistemas de video Beta o VHS, el teclado QWERTY o el DSK, etc.). Estas tecnologías pueden ser pensadas como competidoras en un mercado amplio de adoptantes, quienes lo hacen inconsciente y pasivamente como especies biológicas o consiente y estratégicamente si son productos que pueden ser apreciados (*pricing*) y manipulados.[50] Si es el primer caso, el hecho de que las tecnologías en sí mismas tienen características diversas (altamente desarrolladas, alternativas, útiles para condiciones específicas, extendidas, etc.) que generan incertidumbre y a su vez una alta inestabilidad del mercado. Así, el hecho de que algunos (incluso por razones aleatorias) adopten alguna tecnología puede formar rendimientos crecientes por adopción y que puede tener varias fuentes: aprendizaje por uso (*learning by doing*), externalidades de redes (*network externalities*), economías a escala en la producción, rendimientos crecientes de información, e interrelación tecnológica. Todas estas fuentes de rendimientos crecientes por adopción están interrelacionadas y pueden provocar que una de las tecnologías se imponga a pesar de

[50] Si no son apreciadas y manipuladas se dice que no son patrocinadas (*sponsored*), concepto acuñado por P. David (1983).

que no sea socialmente la más eficiente. Así, los rendimientos crecientes por adopción, independientemente de su fuente, determinan el carácter de la competencia tecnológica. Así, si una tecnología corre con suerte y obtiene alguna ventaja por estos rendimientos crecientes, puede inclinar el mercado de adoptantes a su favor y dominarlo. Sin embargo, si otras también obtienen algunas de estas ventajas pueden ganar alguna parte del mercado de tal modo que se pueden establecer múltiples equilibrios.

Este modelo fue ampliado por el propio David (2000) y se puede resumir de la siguiente forma. La tecnologías *no-sponsored* compiten y, si por pequeños cambios (aleatorios), una tecnología es adoptada por un número de agentes en el mercado, existe alguna fuente de rendimientos crecientes por adopción (i.e. interrelación tecnológica) y, si el agente se atiene a su decisión, una tecnología dominará a otra aunque no sea la mejor, esto implica ineficiencia potencial e irreversibilidad. En otro caso, cuando la tecnología también es *no-sponsored*, y un tipo de agente *r* prefiere una tecnología *x* y un tipo de agente *s* prefiere una tecnología *y*, cuando el tamaño del tipo de agentes es más o menos parecido, si se presentan pequeños eventos desconocidos (ligeras variaciones aleatorias exógenas) y dadas algunas probabilidades de que cualquier de los *r* o *s* agentes adopten la tecnología *x* o *y*, las concurrencia en el mercado de alguno de los tipos de agentes generará distintas combinaciones que sobrepasarán las preferencias de los agentes generados por los rendimientos crecientes por adopción, de tal modo que el procesos será inherentemente inestable, no se garantiza la eficiencia tecnológica y se generará naturalmente el *path-dependence*, el efecto *lock-in*, no-ergodicidad y reflexibilidad[51]. Esto es, el *path-dependence* es justamente el resultado de que la historia importa. El hecho de que en condiciones de incertidumbre (inherentes a las nuevas tecnologías) existan algunos elementos que obliguen a los agentes a optar (seleccionar) por la tecnología que tenga ventajas generadas por la propia selección más que por sus características propias impulsados por pequeños factores aleatorios (no-ergodicidad[52])

[51] La reflexibilidad es una propiedad de las relaciones de elementos de un conjunto. Se dice que una relación es reflexiva si un elemento del conjunto A tiene una relación consigo mismo R, es decir, $\forall x \in A, xRx$. En la teoría de redes esta propiedad se manifiesta con un *bucle*, es decir, cuando un nodo tiene un vínculo consigo mismo.

[52] La ergodicidad es un concepto tomado de la física que significa que los sistemas tiendan a un equilibrio único y estable generado dentro del propio sistema. En términos estadísticos la no-ergodicidad significaría el incumplimiento del Teorema del Límite Central y en términos del calculo diferencial que las raíces no sean unitarias.

generan un fenómeno de encerramiento (*lock-in*) de tal modo que la selección se vuelve reflexiva[53]. En el modelo de David (2000), se puede observar en conclusión que el reforzamiento de un nodo (en este caso tecnología) puede deberse incluso a factores aleatorios y que el factor temporal es fundamental, lo cual es consistente con la formación de *clusters* derivados de la aportación de la teoría de redes descrita en el capítulo anterior.

Como se verá en el siguiente capítulo este fenómeno es relevante puesto que las innovaciones serán producto de las variaciones -realizadas con unos objetivos determinados o aleatorios (no-ergódicas)- restringidas (*lock-in*) por el conocimiento previo, el nivel de complejidad del tipo de bien que se genere y el nivel de aptitud que tengan frente al mercado.

Hasta este momento contamos con un marco teórico que como se demostró a lo largo de este capítulo es adecuado para explicar y enlazar los distintos temas de la innovación tecnológica, sin embargo, es necesario entender el funcionamiento en conjunto, los principales componentes de un modelo en el que participen los elementos metodológicos descritos hasta ahora será el objetivo del siguiente capítulo.

[53] La reflexibidad en este contexto significa que entre más se repita el proceso éste se volverá cada vez más fuerte, puesto que, aunque existan variaciones, los agentes seleccionaran las opciones (tecnologías) ya conocidas. Es decir, se crea un fenómeno *lock-in*.

CAPÍTULO 4. MODELO DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA A PARTIR DEL USO DE LOS SCA.

INTRODUCCIÓN

Como resultado de lo relatado en los capítulos anteriores, en el presente se desarrollará un modelo de innovación tecnológica formal a partir de las relaciones que se han discutido. En primer lugar, se determinarán los elementos básicos que componen el modelo (supuestos fundamentales y de descomposición), enseguida se explicará como a partir de pequeñas variaciones aleatorias o del ambiente comienza a emerger la complejidad a partir de la formación de reglas hechas por la verificación de hipótesis que se seleccionan a partir de un esquema de asignación de crédito. Todo esto tiene como base las aportaciones de Holland (1996). Posteriormente, explicará la relación entre función y componentes (ampliamente desarrollado por Frenken, 2006) lo cual como se verá es el elemento clave para enlazar las necesidades con las características de los bienes. Con estos instrumentos podremos entonces presentar el proceso por medio del cual emerge un nuevo producto dirigido por una demanda externa (*deman pull*) y como una variación de un producto previo. Enseguida se presentará la emergencia de otro producto pero por el lado de la oferta (*technology push*) a partir de tres fuente: a) economía de recursos, b) incremento de mercados y c) cambios en las fuerzas productivas. Se observará el cambio en las poblaciones y el incremento en la complejidad. Y finalmente se observará y concluirá como a partir de este modelo se forma gradualmente una empresa de tipo integral que tenderá a conformarse como en una empresa de tipo modular y se puntualizará como se integran algunos de los temas de la innovación en el modelo.

4.1. MODELO BÁSICO.

4.1.1. Supuestos fundamentales:

a) Existe un conjunto de **C** agentes que requieren satisfacer **S** necesidades por medio de **X** bienes que son producidos por **E** empresas.
b) El agente $c_i \in \mathbf{C}$ donde $1 \leq i \leq N_c$

c) Las necesidades del agente i pueden describirse como una cadena binaria de la forma $s_i = [0,1,\#,\&]$
d) El bien $x_i \in \mathbf{X}$ donde $1 \leq i \leq N_x$
e) Los bienes pueden describirse como una cadena binaria de forma $x_i = [0,1,\#,\&]$
f) La empresa $e_i \in \mathbf{E}$ donde $1 \leq i \leq N_e$
g) Por la propiedad de agregación $\mathbf{E} \subset \mathbf{P(C)}$[54]
h) Las empresas requieren de recursos físicos **R** y **X** y humanos **H** para producir los bienes.
i) Por simplicidad, los recursos **R** son tomados y dejados libremente de y en la naturaleza bajo la propiedad de libre disposición (*free disposal*).
j) El recurso $r_i \in \mathbf{R}$ donde $1 \leq i \leq N_r$
k) $r_i = \bar{r}_i$ para t_i, es decir, puede ser tomado y dejado libremente pero es limitado para cada t_i
l) La persona $h_i \in \mathbf{H}$ donde $1 \leq i \leq N_h$
m) Las personas **H** requieren de los bienes **X** para reproducirse
n) Las personas **H** proveen del recurso trabajo **W** a las empresas
o) El trabajo $w_i \in \mathbf{W}$ donde $1 \leq i \leq N_w$
p) Por la propiedad de agregación $\mathbf{H} \subset \mathbf{P(C)}$. Esto es, las personas pertenecen al conjunto de los agentes que consumen pero son distintas al resto de los consumidores.
q) Para diferenciar a los consumidores $\mathbf{E} \not\subset \mathbf{H} \wedge \mathbf{E} \not\supset \mathbf{H}$.
r) Las empresas cuentan con un conjunto de mecanismos **D** para detectar las necesidades **S** de los agentes.
s) El mecanismo de detección d_i puede describirse como una cadena binaria de la forma $d_i = [0,1,\#,\&]$
t) El mecanismo de detección $d_i \in \mathbf{D}$ donde $1 \leq i \leq N_d$
u) La demanda total de bienes $\mathbf{Xd} = \mathbf{C} \times \mathbf{S}$
v) Los agentes cuentan con un mecanismo de asignación de valor (ordinal) **V** para la satisfacción de sus necesidades.
w) c_i asigna uno y solo un v_i para cada $x_i \Rightarrow \mathbf{V}_{C \times X}$

[54] **P(C)** es el conjunto potencia de **C**, es decir, el conjunto de todos los subconjuntos posibles de **C**. De g) y b) se infiere que las empresas pertenecen al conjunto de los agentes que consumen pero no necesariamente son todos los consumidores.

4.1.2. Supuestos de perfecta descomposición

Por simplicidad didáctica comenzaremos asumiendo que existe perfecta descomposición y esto se representa a partir de los siguientes supuestos:

1. Cada uno de los agentes es idéntico al de su tipo.
2. En principio cada empresa produce uno y un solo bien.
3. Para cada necesidad existe uno y un solo bien que la satisface.
4. La longitud de las cadenas L es el mismo para cada una.
5. Cada posición de la cadena se relaciona unívocamente a la misma posición de las otras cadenas.
6. La relación entre cada una de las posiciones son no dirigidas, no ponderas, simples y conectadas.
7. Hay perfecta descomposición (K=1) por lo tanto las relaciones epistáticas son redes separadas al interior de las cadenas.

Además, sin perder generalidad presentaremos una versión 3x3x3x3 del modelo, es decir:

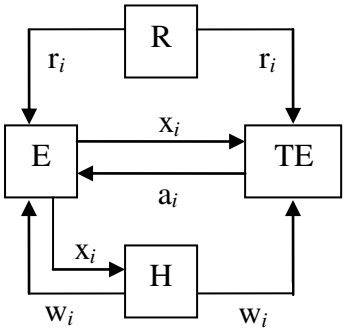
a) Hay 2 conjuntos de empresas diferenciados por el tipo de bien que producen: proveedores de bienes de consumo final (*commodities*) y proveedoras de tecnología $[e_i, te_i] \in E$
b) Existen 3 poblaciones de empresas e_1, e_2, y e_3 que producen respectivamente x_1, x_2, y x_3 bienes de consumo.
c) Existen 3 poblaciones de empresas proveedoras de tecnología te_1, te_2 y te_3 que producen respectivamente las tecnologías a_1, a_2 y a_3 respectivamente. (Note que $a_i \in \mathbf{A} \subset \mathbf{X}$, es decir, por agregación los bienes tecnológicos son un subconjunto de todos los bienes)
d) Inicialmente el tamaño de la población Z de cada una de las empresas es el mismo $Ze_1 = Ze_2 = Ze_3 = Zte_1 = Zte_2 = Zte_3$
e) Existen 3 tipos de población de personas h_1, h_2 y h_3 que consumen los 3 bienes.
f) Inicialmente el tamaño de las población Z de cada uno de los tipos de personas es el mismo $Z_{h1} = Z_{h2} = Z_{h3}$
g) Existen 3 recursos libres r_1, r_2, y r_3 agotados completamente para cada t_i.

4.2. DESARROLLO

4.2.1. Agentes, relaciones y configuraciones genéticas

Las relaciones entre los agentes se muestran en el siguiente diagrama, que no es otra cosa que el flujo circular de la economía real.

Fig. 28. Agentes y flujos del modelo



Note que mientras que los conjuntos de agentes están en los recuadros, los flujos (bienes X, trabajo W, bines tecnológicos A y los recursos R) circulan entre los agentes y determinan las relaciones que existen entre ellos.

Arbitrariamente fijemos Z_e=3, lo cual significa que hay tres empresas idénticas (e_1) que producen el bien x_1, tres (e_2) que producen el bien x_2 y tres (e_3) que producen el bien x_3; visto desde otra perspectiva puede ser una empresa (e_1) con tres plantas que produce el bien x_1, otra (e_2) con igual número de plantas que produce x_2 y una tercera (e_3) igualmente con tres plantas idénticas que producen el bien x_3. Desde luego este es un supuesto fuerte pero sirve solo para ejemplificar el crecimiento o decrecimiento de una población en función de pequeños cambios de distinta naturaleza. Por nuestros supuestos Z_e=Z_{et}=Z_h, y el razonamiento es el mismo.

A partir de nuestros supuestos de descomposición perfecta las relaciones se presentan como cadenas binarias en las que se requieren mutuamente de recursos ordenados de distinta forma para configurar cada uno de los productos, en nuestra propuestas, las tres primeras posiciones se refieren al bien x_1, x_2 y x_3 respectivamente, las siguientes tres posiciones a los bienes tecnológicos a_1, a_2 y a_3; las tres siguientes al trabajo w_1, w_2 y w_3 y las últimas tres a los recursos. La forma general sería (x_1, x_2, x_3,

a_1, a_2, a_3, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2, r_3). De tal modo que podemos presentar los siguientes productos (o isomorficamente los diseños):

Cadena 1. Configuración genética de los bienes x_i

$x_1 = (0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$
$x_2 = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$
$x_3 = (1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1,1)$

Cadena 2. Configuración genética de los bienes a_i

$a_1 = (0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0)$
$a_2 = (0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0)$
$a_3 = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1)$

Donde por ejemplo el bien (o diseño) x_1 no requiere de sí mismo pero para configurarse si requiere del x_2 y x_3, así como de la tecnología a_1 pero no de la a_2, ni de la a_3, así mismo requiere de los tres tipos de trabajo y de los tres recursos tomados de la naturaleza. El resto de los bienes siguen la misma lógica y si se observa a detalle, son presentados con los mismos valores para los alelos pero en distinta posición, lo cual los hace simétricos para subrayar el hecho de que las condiciones iniciales son las mismas. Desde luego este supuesto puede retirarse sin problema pero, conviene para resaltar los cambios en las poblaciones ante las distintas variaciones que se esperan mostrar.

4.2.2. Sistema de desempeño.

Tanto las personas como las empresas cuentan con un sistema de detectores que les permiten identificar la realidad, este sistema también puede verse como una cadena genética en su forma general D(x_1, x_2, x_3, a_1, a_2, a_3, h_1, h_2, h_3, r_1, r_2, r_3). A partir de esta cadena las personas configuran la realidad a partir de la siguiente secuencia Dh_i(x_1, x_2, x_3, #, #, #, #, #, #, &, &, &), donde identificar los bienes es absolutamente relevante, identificar los bienes tecnológicos y la otras poblaciones podrían ser elementos a considerar para la formación de su apreciaciones pero no de forma inmediata, ni directa y la identificación de recursos prácticamente se abstrae. Para el caso de las empresas la cadena sería en estructura de la forma Dx_i (x_1, x_2. x_3, a_1, a_2, a_3, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2, r_3) puesto que identificar todos estos elementos resultan relevantes en su evaluación.

Así, para nuestro modelo podemos presentar los siguientes casos:

Cadena 3. Detectores para las personas

$Dh_1 = (1, 1, 1)$
$Dh_2 = (1, 1, 1)$
$Dh_3 = (1, 1, 1)$

Cadena 4. Detectores para las empresas

$De_1 = (0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$
$De_2 = (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$
$De_3 = (1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1,1)$

$Dte_1 = (0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0)$
$Dte_2 = (0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0)$
$Dte_3 = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1)$

Por el quinto supuesto de descomposición que fijamos arriba las estructuras de todas las cadenas son idénticas al inicio.

Finalmente, tanto las personas como las empresas tienen un vector de evaluación de las reglas el cual al ser idénticas todas las relaciones le dan un valor similar y cualquiera por el hecho de ser ordinal.

A partir de estos elementos los agentes actúan bajo el siguiente procedimiento:

a) Utilizando sus detectores lanzan hipótesis acerca de la realidad,

b) La hipótesis de nuevo pueden verse como una población que sobreviven si se verifican frente a la realidad,

c) Las hipótesis que sobreviven se convierten en reglas de comportamiento de los agentes.

d) En una segunda fase, al encontrar las reglas más adecuadas podrá hacer recombinaciones de las mismas y encontrar nuevas.

4.3. FORMACIÓN DE REGLAS.

Para la formación de reglas el primer paso es que los agentes lanzan un conjunto de hipótesis bajo la estructura general:

SI $Dh_i(x_1, x_2, x_3, \#, \#, \#, \#, \#, \#, \&, \&, \&, \ldots, \#, \ldots \&)$ ENTONCES $(x_1, x_2, x_3, \ldots, \#, \ldots, \&)$

Así por ejemplo, la población h_1 puede lanzar el siguiente conjunto de hipótesis para obtener el bien x_1.

SI (1, 0, 0, 1, 0, 0) ENTONCES (1, 0, 0)
SI (1, 0, 0, 0, 1, 0) ENTONCES (0, 1, 0)
SI (1, 0, 0, 0, 0, 1) ENTONCES (0, 0, 1)
SI (1, 0, 0, 1, 0, 1) ENTONCES (1, 0, 1)
SI (1, 0, 0, 1, 0, 0) ENTONCES (0, 1, 1)

Donde la primera posición del argumento condicional se lee "detecto x_1", la segunda "detecto x_2", la tercera "detecto x_3", la cuarta "en la empresa x_1", la quinta "en la empresa x_2", y la sexta "en la empresa x_3"; mientras que en la primera posición del argumento resultante (efector) es "lo tomo de e_1", la segunda "lo tomo de e_2" y la tercera "lo tomo de e_3"

Entonces las reglas se leen de la siguiente forma:

SI "detecto x_1 en e_1" ENTONCES "lo tomo de e_1"
SI "detecto x_1 en e_2" ENTONCES "lo tomo de e_2"
SI "detecto x_1 en e_3" ENTONCES "lo tomo de e_3"
SI "detecto x_1 en e_1 y en e_3" ENTONCES "lo tomo de e_1 y de e_3"
SI "detecto x_1 en x_1" ENTONCES "lo tomo de e_2 y de e_3"

Cada regla es hipotéticamente pertinente, las cinco propuestas que se presentan aquí combinan contenidos generales y específicos; la primera hipótesis pareciera ser obvia, sin embargo, el agente es inicialmente ciego y no cuenta con información por lo tanto explora posibles soluciones para satisfacer sus necesidades, la segunda y la tercera hipótesis son idénticas (incluso a la primera) en estructura pero no en contenido y frente al desconocimiento de la realidad las hipótesis son pertinentes, la cuarta es una hipótesis interesante puesto que combina condiciones de espacio de localización que como se verá más adelante puede tener implicaciones importantes, la última hipótesis pareciera absurda *a priori*, sin embargo, por el mismo argumento de desconocimiento de la realidad es pertinente.

Desde luego todas las combinaciones de hipótesis pueden presentarse, de hecho con este esquema el total de hipótesis sería del orden de 512 ($2^6 x 2^3$), sin embargo, naturalmente sería imposible probar cada una hasta encontrar la mejor, así, sólo se lanzan algunas y según sobrevivan se encontrara la regla más adecuada.

Los valores de estas reglas se pueden observar en el siguiente cuadro:

Tabla 4. Valores de las hipótesis lanzadas por h_1 para obtener x_1

Regla	Valor
1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0	3
1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0	0
1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1	0
1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1	2
1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1	0
Fuerza promedio=1	

La fuerza de la reglas se mide en función de las implicaciones reproductivas de los agentes que las utilizan, es decir, la reglas no tiene un valor en sí mismas sino en sus resultados, para ilustrar esto podríamos pensar por ejemplo que los miembros del subconjunto h_1 son del orden de 10, 2 miembros utilizan las primera hipótesis, otros 2 la segunda y así sucesivamente, de tal modo que la aplicación de las hipótesis es homogénea a lo largo de la población. Al aplicar la primera hipótesis los resultados son positivos en términos reproductivos de tal forma que se reproducen en tres la población que la utiliza pasando de dos miembros a seis (es decir cada miembro deja tres descendientes que utilizan esta hipótesis), los dos miembro que utilizan la segunda regla no se reproducen puesto que no obtuvieron el bien necesario, lo mismo pasa con los otros dos miembros que utilizan la tercera hipótesis; en el caso de la cuarta, los miembros se reproducen en dos, es decir, al aplicarla pasan de dos miembros a cuatro; y los dos que utilizan la última hipótesis padecen el lamentable hecho de no reproducirse. En consecuencia, la población se mantiene estable en su número 10, pero con dos subpoblaciones que utilizan la primera y la cuarta hipótesis (6 la primera y 4 la segunda). El hecho de que resulten exitosas estas hipótesis las convierte en reglas de supervivencia. Es importante resaltar el hecho de que aunque una tenga mayor fuerza que la otra, ambas se mantienen por lo que permite considerar la coexistencia tanto de reglas como de subpoblaciones.

Una forma alterativa de medir la regla sería por ejemplo que la población que utiliza la primera hipótesis obtiene tres bienes, la que utiliza la cuarta obtiene dos bienes y las restantes ninguno, de tal forma que si se fijara una función de crecimiento de los

agentes cualquiera, por ejemplo $\Delta x_i = 6F/3$, donde F es la fuerza de la regla, entonces en el caso de que se utilice la primera regla la subpoblación que la aplica crecerá en 6, mientras que la cuarta en 4, y se mantiene la posibilidad de la coexistencias de las reglas. Así, cualesquiera que sean las alternativas para medir las reglas es irrelevante, lo fundamental es que discriminen reglas a partir de un criterio de adecuación (*fitness*) consecuente.

Ahora, puesto que es posible la recombinación de reglas puesto que hay perfecta descomposición, entonces aleatoriamente se pueden cruzar las reglas de tal forma que se someten a un segundo proceso de verificación bajo el esquema de ensayo y error a partir del procedimiento que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valor del cruzamiento de las hipótesis lanzadas por h_1 para obtener x_1

N	Regla progenitora	La regla	Cruza en	Con la regla	Regla descendiente	Valor
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 0 0 1 0	0
		1	6	2		
2	1 0 0 0 1 0 0 1 0				1 0 0 0 1 0 0 1 0	0
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 1 0 0 1	0
		1	4	3		
3	1 0 0 0 0 1 0 0 1				1 0 0 0 0 0 1 0 0	1
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 1 1 0 1	1
		1	4	4		
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 0 1 0 0	3
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 0 1 0 1	2
		1	6	4		
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 1 1 0 0	2
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 0 0 1 1	0
		4	5	5		
5	1 0 0 1 0 0 0 1 1				1 0 0 1 0 1 1 0 1	1

Fuerza promedio=1

Sin discriminar las reglas más adecuadas (la 1 y la 4) en la tabla anterior se cruzaron las distintas posibilidades en distintas posiciones (subrayadas en gris) de donde se obtienen tres reglas descendientes que superan el promedio:

1 0 0 1 0 0 1 0 0
1 0 0 1 0 0 1 0 1
1 0 0 1 0 1 1 0 0

Si se observa a detalle, la primera de estas tres reglas descendientes es la primera regla progenitora y en todos los casos aparece el alelo 1 en la primera, cuarta y séptima posición (gen), de tal modo que se puede inducir que la regla general tiene la forma (1, #, #, 1, #, #, 1, #, #). Sin embargo, esto dejaría imprecisiones respecto a la regla dominante. Por lo tanto, un mejor procedimiento, sería tomar sólo las reglas más adecuadas, es decir, la primera y la cuarta que cuentan con una fuerza superior a la del promedio y de nuevo cruzarlas de forma aleatoria. Esto se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 6. Valor de cruzamiento de las mejores reglas lanzadas por h_1 para obtener x_1

N	Regla progenitora	La regla	Cruza en	Con la regla	Regla descendiente	Valor
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 0 1 0 1	2
		1	6	4		
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 1 1 0 0	2
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 1 1 0 1	1
		1	4	4		
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 0 1 0 0	3
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 1 1 0 1	2
		1	2	4		
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 0 1 0 0	3
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 0 1 0 1	2
		1	7	4		
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 1 1 0 0	2
1	1 0 0 1 0 0 1 0 0				1 0 0 1 0 1 1 0 1	2
		4	5	5		
4	1 0 0 1 0 1 1 0 1				1 0 0 1 0 0 1 0 0	3

Fuerza media=2.2

En este caso, todas las reglas tienen un valor positivo, es decir, se obtiene el bien requerido x_1, sin embargo, sólo tres reglas descendientes, superan la fuerza promedio del total de las reglas descendientes, y como se puede observar en realidad es la misma regla: 1 0 0 1 0 0 1 0 0 que no es otra cosa más que la primera regla progenitora inicial.

Así, a partir de la selección y recombinación de las reglas más adecuadas es posible encontrar una regla dominante.

Por su parte las empresas también lanzan un conjunto de hipótesis a verificar. A partir del esquema general Dx_i (x_1, x_2. x_3, a_1, a_2, a_3, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2, r_3).

Una posible hipótesis que puede realizar una de las empresas que producen el bien x_1 es la siguiente:

SI (&, &, 1, 1, 1, 1, 1, 1, &, &, &, &, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
ENTONCES (&, 1, 1, 1, &, &, 1, 1, 1, 1, 1, 1)

Que similar al caso de las personas combinan la detección del flujo requerido y el espacio donde se localiza (condiciones de la hipótesis) con una efecto en el comportamiento de la empresa. De tal modo que la hipótesis anterior se lee de la siguiente forma:

> Como se trata de la empresa que produce el bien x_1 abstrae de su sistema de detección el bien x_1 y su consecuente localización (correspondiente a las dos primeras posiciones del lado condicional), después se lee SI "detecto x_2 en e_2" (correspondiente a la posición 3 y 4), "detecto x_3 en e_3" (para las posiciones 5 y 6), "detecto la tecnología a_1 en te_1" (para las posiciones 7 y 8) y así sucesivamente, ENTONCES "abstraigo x_1" (para la primera posición del efector, "lo tomo de e_2" (para la segunda posición), "lo tomo de e_3" (para la tercera) y así sucesivamente.

Si para este caso sencillo lanzáramos todas las posibles hipótesis el orden sería de 134217728 ($2^{18}x2^9$) posibles combinaciones sin considerar los elementos que se abstrajeron. Naturalmente, esta operación de rastreo es imposible de realizar, si cada hipótesis que se lanzara durara sólo un segundo, la empresa se tardaría poco menos de 4 años y tres meses para presentarlas todas. Esto es lo que en lenguaje de programación se llama "fuerza bruta".

Para resolver este problema hay dos posibles soluciones que no son mutuamente excluyentes pero tampoco complementarias y que son posibles gracias al conjunto de supuestos de perfecta descomposición propuesto al inicio. La primera es separar problemas y recombinar las mejores soluciones hasta encontrar las reglas más adecuadas, y la segunda es crear una regla para la formación de reglas. Usando el lenguaje de Holland, para el primer caso, separar en bloques de construcción y agregar (algo parecido a la modularización), y para el segundo formar meta-reglas (o algo parecido a la formación de heurísticas).

Para el primer caso la secuencia condicional puede dividirse en 4 bloques:

a) (&, &, 1, 1, 1, 1)

b) (1, 1, &, &, &, &)

c) (1, 1, 1, 1, 1, 1)

d) (1, 1, 1, 1, 1, 1)

Donde el primer bloque se refiere a la detección de los bienes x_i, el segundo a las tecnologías te_i, el tercero a los distintos trabajos w_i y el cuarto a los recursos r_i.

Y de igual forma los efectores pueden dividirse en 4:

a) (&, 1, 1)

b) (1, &, &)

c) (1, 1, 1)

d) (1, 1, 1)

Así, es posible crear las siguientes familias de hipótesis:

Para el caso de los bienes x_i las posibles combinaciones son del orden de 64 (2^4x2^2) lo cual es bastante más simple y como en el caso de las personas sólo se lanzan algunas hipótesis, por ejemplo:

SI (&, &, 1, 1, 1, 1) ENTONCES (&, 1, 1)
SI (&, &, 0, 1, 1, 1) ENTONCES (&, 1, 1)
SI (&, &, 1, 1, 0, 1) ENTONCES (&, 0, 1)
SI (&, &, 1, 1, 1, 0) ENTONCES (&, 0, 0)

Que se lee de la siguiente forma:

SI "detecto x_2 en e_2 y en e_3" y "detecto x_3 en e_3 y en e_2" ENTONCES "lo tomo de e_2 y de e_3"
SI "detecto x_3 en e_2 y en e_3" ENTONCES "lo tomo de e_2 de e_3"
SI "detecto x_2 en e_2 y en e_3" ENTONCES "lo tomo de e_3"
SI "detecto x_2 en e_2 y en e_3" ENTONCES "lo tomo de e_3"

Los valores posibles a estas reglas pueden ser los siguientes:

Tabla 7. Valores de las hipótesis del bloque a)

Regla	**Valor**
& & 1 1 1 1 & 1 1	3
& & 0 1 1 1 & 1 1	1
& & 1 1 0 1 & 0 1	0
& & 1 1 1 0 & 0 0	0

Fuerza promedio=1

Donde desde luego se aplica la misma lógica que en el caso de la selección de reglas de las personas, es decir, la fuerza de la regla se mide *ex post* a partir del poder de reproducción final que ejerza sobre la población que la utiliza. De igual forma, las reglas más adecuadas pueden existir siempre y cuando superen la fuerza promedio del total de las reglas.

Si se observa con cuidado, en este caso la regla más adecuada es la primera (& & 1 1 1 1 & 1 1) que independientemente de cualquier cruce que se haga con el resto de las reglas seguirá siendo la más adecuada. Por lo tanto, el procedimiento de recombinación puede ser omitido.

Para el segundo bloque de hipótesis que es del orden de 8 (2^2x2^1), se utiliza el mismo procedimiento:

SI (1, 1, &, &, &, &) ENTONCES (1, &, &)
SI (1, 1, &, &, &, &) ENTONCES (0, &, &)
SI (1, 0, &, &, &, &) ENTONCES (1, &, &)
SI (1, 0, &, &, &, &) ENTONCES (0, &, &)
SI (0, 1, &, &, &, &) ENTONCES (1, &, &)
SI (0, 1, &, &, &, &) ENTONCES (0, &, &)
SI (0, 0, &, &, &, &) ENTONCES (1, &, &)
SI (0, 0, &, &, &, &) ENTONCES (0, &, &)

Que se lee de la siguiente forma:

SI “detecto a_1 en te_1” ENTONCES “lo tomo de te_1”
SI “detecto a1 en te_1” ENTONCES “no lo tomo de te_1”
SI “detecto a1 en ningún lado” ENTONCES “lo tomo de te_1”
SI “detecto a1 en ningún lado” ENTONCES “no lo tomo de te_1”
SI “no detecto a_1 en te_1” ENTONCES “lo tomo de te_1”
SI “no detecto a1 en te_1” ENTONCES “no lo tomo de te_1”
SI “no detecto a1 en ningún lado” ENTONCES “lo tomo de te_1”
SI “no detecto a1 en ningún lado” ENTONCES “no lo tomo de te_1”

Observe que al ser tan pocas combinaciones, es posible explorarlas en su totalidad, lo que antes de la separación (descomposición), era prácticamente imposible. Los valores que toman estas reglas se observan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Valores de las hipótesis del bloque b)

Regla	Valor
1 1 & & & & 1 & &	3
1 1 & & & & 0 & &	0
1 0 & & & & 1 & &	2
1 0 & & & & 0 & &	0
0 1 & & & & 1 & &	1
0 1 & & & & 0 & &	0
0 0 & & & & 1 & &	2
0 0 & & & & 0 & &	0

Fuerza promedio=1

De estas reglas resultan tres que muestran una fuerza mayor a la del promedio del total de las reglas, el procedimiento combinatorio desde luego también puede ser omitido por el hecho de que al hacerlo cualquier combinación que resulte de la primera regla con las otras repercutirá en la formación de la misma primera regla pero con una fuerza promedio del total de combinaciones mayor (i. e. 3/2) que superará al valor de 2 pero será menor que el de tres de tal forma que la primera regla será la dominante.

Para el tercer y cuarto bloque tanto el tamaño de la cadena como los posibles estados son los mismos, así que resolviendo uno, el resultado para el otro es el mismo. Así, las posibles combinaciones para ambos casos son de 512 (2^6x2^3) y de nuevo se plantean algunas hipótesis.

SI (1, 1, 0, 1, 0, 0) ENTONCES (1, 1, 1)
SI (1, 0, 0, 1, 1, 1) ENTONCES (0, 0, 1)
SI (0, 1, 0, 1, 0, 1) ENTONCES (1, 0, 1)
SI (1, 1, 1, 1, 1, 0) ENTONCES (0, 1, 1)

Que se leen de la siguiente forma:

SI "detecto w_1 en h_1 y en h_3" ENTONCES "lo tomo de h_1, h_2 y de h_3"
SI "detecto w_1 en h_2 y en h_3" y "detecto w_3 en h_2 y en h_3" ENTONCES "los tomo de h_3"
SI "no detecto nada en h_1, h_2 y en h_3" ENTONCES "lo tomo de h_1 y de h_3"
SI "detecto w_1, w_2 y w_3 en h_1 y en h_2" ENTONCES "lo tomo de h_2 y de h_3"

La tabla de valores correspondiente a estas propuestas es la siguiente:

Tabla 9. Valores de las hipótesis del bloque c) y d)

Regla	Valor
1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1	2
1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1	2
0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1	0
1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1	2

Fuerza promedio=2

A partir de estos resultados, tres de la cuatro hipótesis propuestas sobreviven pero con la misma fuerza lo cual deja al agente selector de hipótesis tanto en una posibilidad de diversificar sus decisiones como en una posible perplejidad. Se recurre entonces a la combinación de hipótesis considerando las más adecuadas, en este caso la primera, segunda y cuarta.

Tabla 10. Valores del cruzamiento de las mejores hipótesis obtenidas de los bloques c) y d)

N	Regla progenitora	La regla	Cruza en	Con la regla	Regla descendiente	Valor
1	1 1 0 1 0 0 1 1 1				1 1 0 1 0 0 0 0 1	0
		1	6	2		
2	1 0 0 1 1 1 0 0 1				1 0 0 1 1 1 1 1 1	2
1	1 1 0 1 0 0 1 1 1				1 1 0 1 1 0 0 1 1	0
		1	4	4		
4	1 1 1 1 1 0 0 1 1				1 1 1 1 0 0 1 1 1	3
1	1 1 0 1 0 0 1 1 1				1 1 0 1 1 1 0 0 1	2
		1	2	2		
2	1 0 0 1 1 1 0 0 1				1 0 0 1 0 0 1 1 1	1
2	1 0 0 1 1 1 0 0 1				1 0 0 1 1 1 0 0 1	2
		2	4	4		
4	1 1 1 1 1 0 0 1 1				1 1 1 1 1 1 0 0 1	2
2	1 0 0 1 1 1 0 0 1				1 0 1 1 1 0 0 1 1	2
		2	2	4		
4	1 1 1 1 1 0 0 1 1				1 1 0 1 1 1 0 0 1	2

Fuerza media=1.6

En este paso del procedimiento para descubrir reglas se observan 8 hipótesis descendientes que superan al promedio (la segunda, cuarta, quinta, séptima, octava, novena y décima) y una de ellas (la cuarta) con mayor fuerza, el siguiente paso es determinar si dicha hipótesis es la más adecuada, por lo tanto, se realiza de nuevo el proceso de cruzamiento de ésta con el resto y la comparación correspondiente que se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 11. Valores del cruzamiento de la mejor hipótesis obtenida con otras

N	Regla progenitora	La regla	Cruza en	Con la regla	Regla descendiente	Valor
4	1 1 1 1 0 0 1 1 1	4	4	2	1 1 1 1 1 1 1 1 1	5
2	1 0 0 1 1 1 1 1 1				1 0 0 1 0 0 1 1 1	1
4	1 1 1 1 0 0 1 1 1	4	2	5	1 1 0 1 1 1 0 0 1	2
5	1 1 0 1 1 1 0 0 1				1 1 1 1 0 0 1 1 1	3
4	1 1 1 1 0 0 1 1 1	4	5	7	1 1 1 1 0 1 0 0 1	0
7	1 0 0 1 1 1 0 0 1				1 0 0 1 1 0 1 1 1	1
4	1 1 1 1 0 0 1 1 1	4	6	8	1 1 1 1 0 0 0 0 1	0
8	1 1 1 1 1 1 0 0 1				1 1 1 1 1 1 1 1 1	5
4	1 1 1 1 0 0 1 1 1	4	7	9	1 0 1 1 1 0 0 1 1	2
9	1 0 1 1 1 0 0 1 1				1 1 1 1 0 0 1 1 1	2
4	1 1 1 1 0 0 1 1 1	4	1	10	1 1 0 1 1 1 0 0 1	2
10	1 1 0 1 1 1 0 0 1				1 1 1 1 0 0 1 1 1	2

Fuerza media=2.08

Esta tabla es particularmente reveladora en varios sentidos, en primer lugar se observa que de las 4 reglas originales se desprendieron 10 de las cuales 8 se revelaron como adecuadas, en el cruce de las más fuertes se desprenden 12 pero de estas sólo dos superan la fuerza promedio (la primera, cuarta y octava del cuadro anterior inmediato), donde desde luego, la cuarta y octava son la misma hipótesis (111111111), y la cuarta es exactamente la misma hipótesis progenitora. De tal forma que se trata de un

procedimiento dialéctico de expansión y contracción de hipótesis hasta encontrar la propuesta más adecuada. Además, se puede observar que la hipótesis más adecuada se puede desprender de la combinación de dos o más reglas, de tal modo, que es posible encontrar la regla dominante a partir de distintos puntos de partida (condiciones iniciales) y por rutas diferentes. Asimismo, la combinación de hipótesis puede, en algunos casos, ser un proceso tautológico que genere un efecto de encerramiento (*lock in*) como en el caso del cruce de las hipótesis progenitoras 4 y 5; 4 y 9; y 4 y 10, donde las hipótesis descendientes son exactamente las mismas que las progenitoras pero en orden distinto, de tal modo, que si algún agente se mueve en un espacio relativamente corto puede confundir un máximo local con uno global. Finalmente, como se puede inferir fácilmente, la regla dominante (y revelada) es la (11111111) puesto que cualquier recombinación que se haga con la segunda regla más adecuada (111100111) resultará la misma o una con un valor de adecuación más bajo, por lo tanto el procedimiento se termina y se descubre la regla más adecuada. Huelga decir, que esta regla así como todas las que se han revelado sólo son las más adecuadas si no cambian las condiciones, si estas cambian, los valores asignados cambiarán y por lo tanto se abre la posibilidad de descubrir nuevas reglas.

Puesto que la estructura del recurso trabajo es para nuestro ejemplo idéntico al de recursos tomados libremente de la naturaleza la regla más adecuada es la misma. Así, reorganizando las familias de hipótesis descubrimos que la regla más adecuada es:

SI (& & 1 1 1 1 1 1 & & & & 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1) ENTONCES (&1 1 1 & & 1 1 1 1 1 1)

Como se mencionó arriba, el total de posibles reglas es de 134217728 y probar cada una es prácticamente inútil, sin embargo con este mecanismo de separación y verificación de pruebas se puede encontrar de una forma relativamente simple y aunque es plausible suponer que es la regla más adecuada, no podemos estar seguros. Cabe señalar, que si calculamos el producto de las combinatorias de los bloques que utilizamos (64, 8, 512 y 512) el resultado es desde luego el total de combinaciones de la regla, es decir, 134217728, por lo tanto, de alguna manera se exploró el total de áreas de la regla.

El otro procedimiento es otra hipótesis indirecta formulada a partir de una abstracción distinta que asocia el elemento requerido, su localización y su apropiación.

Es una familia de hipótesis basadas en un bloque de construcción que asocia los tres elementos a partir de la siguiente abstracción: SI "el elemento que (SI o NO) requiero" "(SI o NO) está en tal espacio" ENTONCES "(SI o NO) lo tomo de ese espacio". Que en la forma binaria que hemos utilizado se puede representar de la siguiente manera:

SI (1, 1) ENTONCES (1)
SI (1, 1) ENTONCES (0)
SI (1, 0) ENTONCES (1)
SI (1, 0) ENTONCES (0)
SI (0, 1) ENTONCES (1)
SI (0, 1) ENTONCES (0)
SI (0, 0) ENTONCES (1)
SI (0, 0) ENTONCES (0)

Estas hipótesis se leen respectivamente de la siguiente manera:

SI "el elemento que si requiero, si está en tal espacio" ENTONCES "si lo tomo de ese espacio"
SI "el elemento que si requiero, si está en tal espacio" ENTONCES "no lo tomo de ese espacio"
SI "el elemento que si requiero, no está en tal espacio" ENTONCES "si lo tomo de ese espacio"
SI "el elemento que si requiero, no está en tal espacio" ENTONCES "no lo tomo de ese espacio"
SI "el elemento que no requiero, si está en tal espacio" ENTONCES "si lo tomo de ese espacio"
SI "el elemento que no requiero, si está en tal espacio" ENTONCES "no lo tomo de ese espacio"
SI "el elemento que no, requiero, no está en tal espacio" ENTONCES "si lo tomo de ese espacio"
SI "el elemento que no requiero, no está en tal espacio" ENTONCES "no lo tomo de ese espacio"

Observe que la abstracción se manifiesta en dos componentes, el primero en el componente "elemento" donde dialécticamente puede ser cualquiera de los 9 elementos requeridos por la empresa (en este caso para e_1: x_2, x_3, t_1, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2 y r_3) y al mismo tiempo, para que cobre sentido, uno en particular. Por la propiedad de agregación de los sistemas complejos adaptables es posible realizar esta abstracción pues en este caso la palabra "elemento" permite agregar en un solo componente al conjunto de insumos requeridos por la empresa.[55] La segunda abstracción se refiere al espacio, donde "tal" espacio de nuevo se refiere a cualquiera pero al mismo tiempo a uno en particular y por lo tanto, el "tal" espacio, se vincula unívocamente a "ese" espacio que se indica en el efector. Esta aclaración es importante en términos prácticos, puesto que al verificar la hipótesis, la generalidad implícita en estas propuestas

[55] Formalmente la agregación es un producto distinto a los elementos que la componen, por lo tanto, se requiere abstraer algunas características de dichos elementos para reconfigurarlos de tal modo que conformen el nuevo producto, así, la abstracción es una condición suficiente pero no necesaria para la agregación.

hipotéticas, sólo se verifica a partir de la experiencia con la realidad que si requiere de las particularidades.

Así, a pesar de ser este conjunto de hipótesis una abstracción para formar una regla es necesario verificarlas con la realidad para determinar el nivel de adecuación. Dicha verificación requiere ser aleatoria para que su validez por probabilidad sea de carácter general. De tal modo que puede presentarse el siguiente caso para el caso de la empresa 1:

Tabla 12. Valores las hipótesis lanzadas por la empresa e_1

Regla	Aplicada en	Valor
1 1 1	##&&##########################&##########	3
1 1 0	######&&#######################&########	0
1 0 1	##############&&################&####	0
1 0 0	########################&&###########&	0
0 1 1	############&&##################&#####	0
0 1 0	####&&#########################&#########	0
0 0 1	####################&&#############&#	0
0 0 0	###################&&##############&##	0

Fuerza promedio=3/8

En este caso la distribución aleatoria es la siguiente: para la primera hipótesis se aplica en el insumo requerido x_2, la segunda para la tecnología t_1, la tercera para el tipo de trabajo w_2, la cuarta para el recurso natural r_3, la quinta para el tipo de trabajo w_1, la sexta para el insumo x_3, la séptima para el recurso natural r_2 y la octava para el recurso natural r_1. Los valores resultantes de la aplicación de la hipótesis nos arroja una sola regla que se encuentra sobre la fuerza promedio: (1,1,1). Es importante resaltar que a diferencia de la formación de reglas anteriores, en este caso, se presenta el factor "requiero", mientras que en las anteriores el factor determinante de valor era el "detecto", es decir, en este caso, la secuencia "requerir-tomar-detectar" forman en conjunto las condiciones que le asignan valor a la hipótesis, es decir, su grado de adecuación, mientras que en los casos anteriores la secuencia "tomar-detectar" forman el valor. Note que para la formación de reglas "tomar" antecede a "detectar" puesto que

solo a partir de la *efectividad* de obtener el bien o insumo la propuesta más adecuada para detectarlo obtiene su nivel de adecuación (*fitness*).

De tal modo, que extendiendo esta nueva regla a cada componente de la cadena el despliegue es el siguiente:

SI (# # 1 1 # # # # # # # # # # # # # # # # # # #) ENTONCES (# 1 # # # # # # # # # #)
SI (# # # # 1 1 # # # # # # # # # # # # # # # #) ENTONCES (# # 1 # # # # # # # # #)
SI (# # # # # # 1 1 # # # # # # # # # # # # # #) ENTONCES (# # # 1 # # # # # # # #)
SI (# # # # # # # # 1 1 # # # # # # # # # # # #) ENTONCES (# # # # 1 # # # # # # #)
SI (# # # # # # # # # # # # # # 1 1 # # # # # # #) ENTONCES (# # # # # # # 1 # # # #)
SI (# # # # # # # # # # # # # # # 1 1 # # # # # #) ENTONCES (# # # # # # # # 1 # # #)
SI (# # # # # # # # # # # # # # # # # 1 1 # # # #) ENTONCES (# # # # # # # # # 1 # #)
SI (# # # # # # # # # # # # # # # # # # # 1 1 # #) ENTONCES (# # # # # # # # # # 1 #)
SI (# 1 1) ENTONCES (# # # # # # # # # # # 1)

Y compactando toda la secuencia en una sola regla particular el resultado sería:

SI (# # 1 1 1 1 1 1 # # # # # 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1) ENTONCES (#1 1 1 # # 1 1 1 1 1 1)

Que es estructuralmente la misma regla que se había descubierto con el método anterior, aunque es necesario resaltar que no necesariamente siempre sucede esta coincidencia para todos los casos.

Además de la proposición que estructura las hipótesis de ambos métodos (SI "detecto" ENTONCES "lo tomo" *versus* SI "requiero" y "esta" ENTONCES "lo tomo", las diferencias entre los dos métodos son las siguientes:

a) En el primer método la descomposición se realiza arbitrariamente con la única intención de reducir el tamaño de la cadena, mientras que en el segundo la descomposición se reduce al mínimo posible para que la abstracción sea lo más general posible.

b) En el primer caso, al interior de los bloques de construcción no existe una relación epistética *ex ante* determinada por la proposición, mientras que en el segundo, si existe dicha relación que vincula el elemento requerido con la posición en la que se encuentra.[56]

c) Las asignaciones de crédito (tablas de valores) son distintas a partir del resultado vinculado con la propuestas hipotética, es decir, en el primer caso el valor se

[56] Esto último podría superarse pero sólo generaría más cadenas que para términos didácticos sólo complicaría innecesariamente el análisis.

asigna a partir de obtener o no el bien que se espera detectar, mientras que en el segundo caso la asignación de valor se determina a partir de obtener el bien a partir del requerimiento puntual y su detección espacial, de tal modo que obtenerlo no solo es positivo, sino que además debe de ser el bien requerido.

Por otro lado, la coincidencia en los resultados se debe principalmente a tres razones: 1) El ejemplo es muy sencillo y por lo tanto como las relaciones son simples y simétricas entre los bloques de construcción los resultados tienden a converger, 2) el nivel de abstracción que se aplica es de un solo nivel y esto provoca que no se alejen los resultados de cierta vecindad y 3) la naturaleza física del caso es la misma en la abstracción del segundo método que en el análisis del primero y por lo tanto, la naturaleza de los resultados pertenece al mismo espacio. En contraposición a esto, si el ejemplo fuera más complejo, las relaciones epistéticas serían mayores y por lo tanto, en la separación de bloques, las estructuras resultantes podrían no ser simétricas de tal modo que en la aplicación de los métodos los resultados podrían ser diversos (la complejidad crea diversidad y viceversa). Además, conforme se va aumentando el nivel de abstracción se pierden elementos particulares y por lo tanto al formar reglas dichos elementos generan variaciones, y finalmente, las "cosas" tienen desde el punto de vista de un agente una naturaleza física o etérea (o ambas), cuando los niveles de abstracción se alejan de las particularidades de un caso, más casos entran en dicha abstracción y algunos de los que entran pueden tener una naturaleza distinta lo que provoca que los resultados varíen.

Para el caso de las empresas tecnológicas et_i, los métodos para la formación de reglas son las mismas y por nuestros supuestos los resultados son idénticos. De tal modo que para el caso de la empresa te_1 la regla resultante será:

Si (& & 1 1 & & & & 1 1 & & 1 1 & & & & 1 1 & & & &) ENTONCES (& 1 & & 1 & & 1 & &)

Omito el procedimiento para el descubrimiento de dicha regla puesto que es similar al resto de los procedimientos realizado anteriormente.

Ahora, si no existen variaciones significativas en la formación de reglas entonces, los resultados para nuestro ejemplo sería el siguiente para todas nuestras poblaciones que estructuralmente son idénticas:

Dh_1: SI (1,1,1,1,1,1,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#) ENTONCES (1,1,1,#,#,#,#,#,#,#,#,#)
Dh_2: SI (1,1,1,1,1,1,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#) ENTONCES (1,1,1,#,#,#,#,#,#,#,#,#)
Dh_3: SI (1,1,1,1,1,1,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#,#) ENTONCES (1,1,1,#,#,#,#,#,#,#,#,#)
De_1: SI (#,#,1,1,1,1,1,1,#,#,#,#,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1) ENTONCES (#,1,1,1,#,#,1,1,1,1,1,1)
De_2: SI (1,1,#,#,1,1,#,#,1,1,#,#,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1) ENTONCES (1,#,1,#,1,#,1,1,1,1,1,1)
De_3: SI (1,1,1,1,#,#,#,#,#,#,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1) ENTONCES (1,1,#,#,#,1,1,1,1,1,1,1)
Dte_1: SI (#,#,1,1,#,#,#,#,1,1,#,#,1,1,#,#,#,#,1,1,#,#,#,#) ENTONCES (#,1,#,#,1,#,1,#,#,1,#,#)
Dte_2: SI (#,#,#,#,1,1,#,#,#,#,1,1,#,#,1,1,#,#,#,#,1,1,#,#) ENTONCES (#,#,1,#,#,1,#,1,#,#,1,#)
Dte_3: SI (1,1,#,#,#,#,1,1,#,#,#,#,#,#,#,#,1,1,#,#,#,#,1,1) ENTONCES (1,#,#,1,#,#,#,#,1,#,#,1)

Donde la estructura general correspondiente a cada gen es:

SI (x_1, e_1, x_2, e_2, x_3, e_3, a_1, et_1, a_2, et_2, a_3, et_3, r_1, R_1, r_2, R_2, r_3, R_3)
ENTONCES (e_1, e_2, e_3, et_1, et_2, et_3, h_1, h_2, h_3, R_1, R_2, R_3)[57]

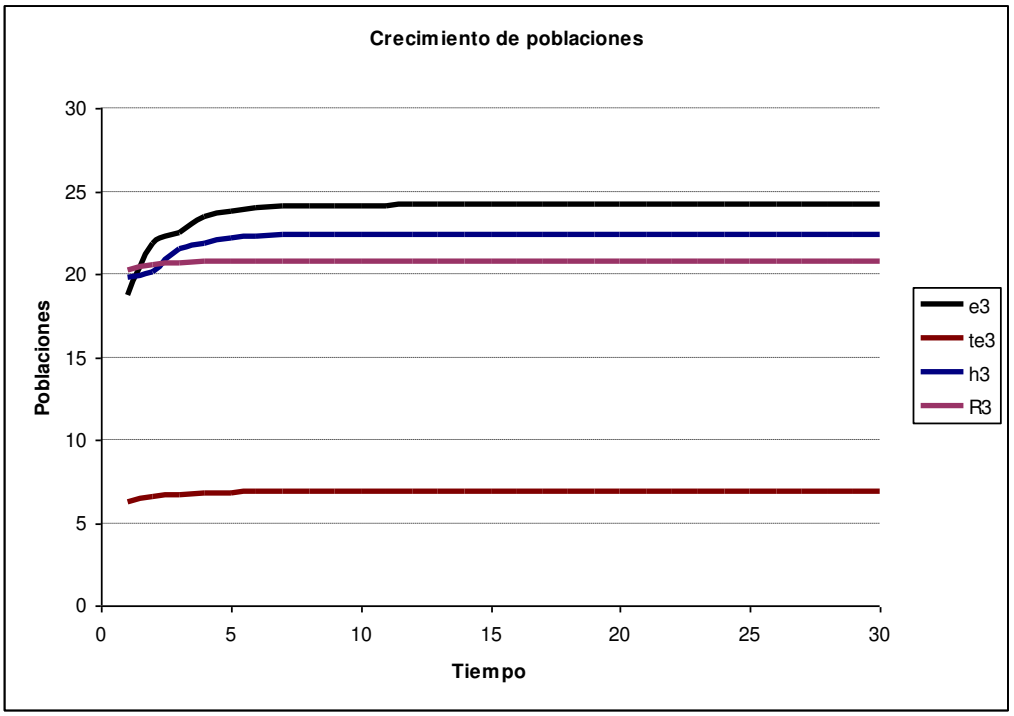
Resultaría obvio concluir que puesto que todas las condiciones son estructuralmente idénticas se encontraría un equilibrio perfecto representado por un crecimiento estable de todas las poblaciones y donde el único factor que pone límite al crecimiento es la tasa de explotación de los recursos naturales, representado en este texto con la variable R.

Desde luego, cada una de las poblaciones no tienen que crecer a la misma tasa, sin embargo, por nuestras condiciones iniciales las tasas de crecimiento interno de cada uno de los sectores si crece a la misma tasa. Esto puede observarse en una gráfica arbitraria como la siguiente para ilustrar el punto.

---

[57] Note que para el caso de los detectores de los bienes requeridos por las personas la estructura utilizada fue: SI (x_1, x_2, x_3, e_1, e_2, e_2) ENTONCES (e_1, e_2, e_3) donde se ordenaba primero todo el conjunto de bienes (x_1, x_2, x_3) y después el conjunto de lugares (empresas) donde podían ser localizados (e_1, e_2, e_3), mientras que en el caso de las empresas que localizaban insumos, el ordenamiento intercalado de genes fue: SI (x_1, e_1, x_2, e_2, x_3, e_3, a_1, et_1, a_2, et_2, a_3, et_3, r_1, R_1, r_2, R_2, r_3, R_3) ENTONCES (e_1, e_2, e_3, et_1, et_2, et_3, h_1, h_2, h_3, R_1, R_2, R_3) donde el gen correspondiente al espacio de localización del insumo a detectar se encontraba inmediatamente después del insumo. Esto es irrelevante para los resultados, de tal modo que las posiciones de los genes no tienen una significación analítica *per se*, sin embargo, es conveniente unificar el ordenamiento para evitar confusiones en el análisis.

Fig. 29. Imagen arbitraria del crecimiento de las poblaciones



En la gráfica se puede observar que las distintas poblaciones crecen a distintas tasas pero, por construcción, es la misma para cada uno de los sectores. Note además que las tasas son asintóticamente convergentes para todos los casos (aunque a distintos niveles) por el hecho de que el sistema se encuentra limitado por una tasa creciente y endógena de la explotación de los recursos, así como a unas funciones de producción suaves. Si no fuera este el caso en muy pocos periodos el sistema acabaría con las poblaciones o sería muy poco estable. Estos resultados son lo más parecido a las conclusiones del modelo neoclásico.

4.4. FUNCIÓN Y COMPONENTE.

Hasta este momento, se ha propuesto que tanto los bienes como los insumos y los recursos libres satisfacen necesidades de las personas o requerimientos de las empresas de forma general, sin embargo, esto requiere de cierta precisión. Cada bien, insumo o recurso cuenta con propiedades particulares (cualidades) que son utilizadas

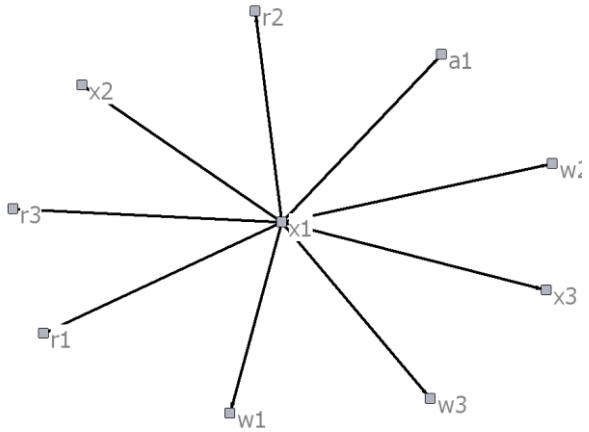
por los agentes para satisfacer dichas necesidades. Implícitamente, se ha asumido que cada bien, insumo o recursos satisface una única necesidad para cada tipo de agente, sin embargo, esto no necesariamente es así y este hecho es particularmente relevante puesto que si un componente cumple con más de una función su relación epistética aumenta y la complejidad del sistema también. Así, en nuestro modelo las relaciones se presentan de la siguiente forma:

Tabla 13. Matriz de requerimientos de los bienes, insumos o servicios

El agente:	Que oferta:	Requiere del bien, insumo o servicio:											
e_1	x_1		x_2	x_3	a_1			w_1	w_2	w_3	r_1	r_2	r_3
e_2	x_2	x_1		x_3		a_2		w_1	w_2	w_3	r_1	r_2	r_3
e_3	x_3	x_1	x_2				a_3	w_1	w_2	w_3	r_1	r_2	r_3
te_1	a_1		x_2			a_2		w_1			r_1		
te_2	a_2			x_3			a_3		w_2			r_2	
te_3	a_3	x_1			a_1					w_3			r_3
h_1	w_1	x_1	x_2	x_3									
h_2	w_2	x_1	x_2	x_3									
h_3	w_3	x_1	x_2	x_3									

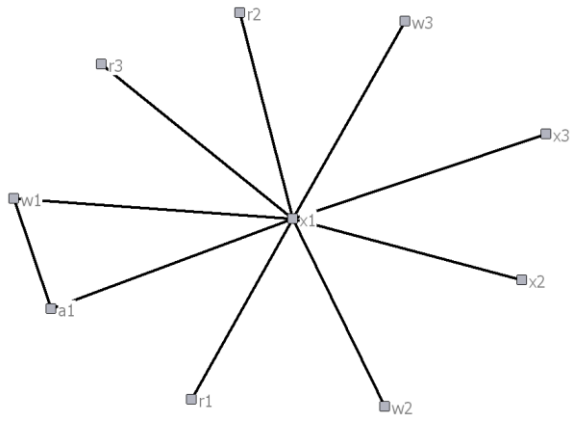
Si analizamos por ejemplo el bien x_1, éste requiere tanto del bien x_2 como del x_3, así como de la tecnología a_1 y de los tres tipos de trabajo w_1, w_2, w_3, así como de los tres tipos de recursos libres r_1, r_2, r_3. Esto quiere decir que cada uno de los componentes que conforman al bien x_1 cumplen por lo menos con alguna función que lo configura. Si algunos de los componentes faltarán no podría conformarse el bien, sin embargo, no se presenta una relación condicional entre el resto de los componentes, por lo tanto la relación epistética entre componentes es nula. Gráficamente esto puede verse de la siguiente forma:

Fig. 30. Relaciones simples del bien x_1



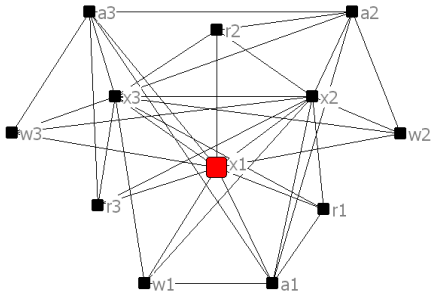
Ahora, si por ejemplo, algunos de los componentes mantienen una relación intrínseca entre ellos cabe la posibilidad de que esta relación satisfaga una o más funciones, por lo tanto la relación epistética (y por lo tanto el nivel de complejidad) aumenta en el interior de la configuración del bien x_1. Lo significa que existe tanto una relación técnica-cualitativa que crea una jerarquía entre los componentes Gráficamente:

Fig. 31. Relaciones relativamente complejas del bien x_1



Ahora, puesto que por construcción cada componente se encuentra vinculado de alguna manera con el resto, en realidad, para configurar el bien x1 se requiere de todos, por lo tanto, la relación epistética es mayor y en consecuencia más compleja. Gráficamente:

Fig. 32. Máxima complejidad de las relaciones del bien x_1



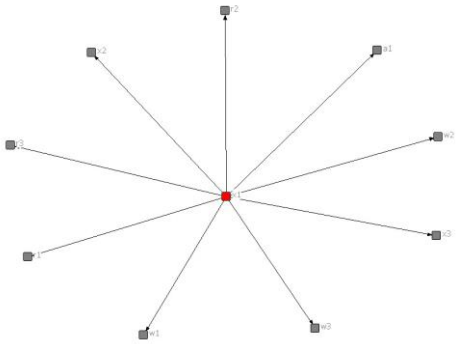
A partir de estos hechos se pueden concluir dos ideas fundamentales y complementarias. La primera es que la relación que existe entre componentes se basa técnicamente a partir de una jerarquía doble, por un lado, a partir de la función que desempeñan y posteriormente de la interconexión que tienen entre ellos para satisfacer dicha función. La otra es que dependiendo el nivel alcance del análisis de los componentes se relacionan cada vez más, de tal forma que tanto la complejidad como la relación epistética es mayor (aunque esto no implica necesariamente un aumento en la densidad de la red) generando el efecto de los mundos pequeños, donde todo termina finalmente relacionado con el resto. Es por ello que aunque nuestro supuesto inicial de que K=1, sólo se puede sostener en el análisis de un solo bien, puesto que conforme se estudie un subsistema mayor, esto es prácticamente imposible de mantener.

En conjunto, ambas condiciones son fundamentales para determinar el cambio puesto que éste puede ser producto del cambio en las funciones, lo cual puede implicar un cambio en las relaciones jerárquicas de los componentes o en la propia sustitución de los mismos o desde otra perspectiva, los cambios en los componentes o en sus relaciones implican efectos sobre las funciones aunque no necesariamente el cambio en la función última que determina el producto final. Sin embargo, cualquiera que sea el efecto que origine el cambio, esto repercutirá en alguna medida (baja o alta) en el conjunto del sistema. Lo anterior se puede observar mediante el siguiente razonamiento tomando como ejemplo al bien x_1. El bien tiene ciertas características cualitativas que lo conforman de tal modo que presenta una matriz de componentes de la siguiente forma:

$$x_1 = \begin{matrix} x_2 \\ x_3 \\ a_1 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{matrix}$$

Gráficamente:

Fig. 33. Relaciones simples del bien x_1



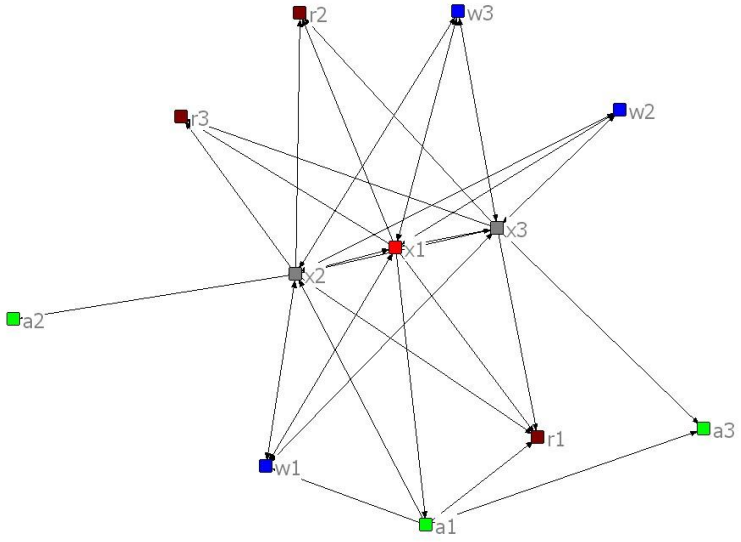
Estos componentes a su vez despliegan una matriz binaria ampliada de los componentes donde los renglones representan a los componentes del bien x_1 y las columnas al total de componentes existentes.

Fig. 34. Matriz binaria de componentes del bien x_1

$$x_1 = \begin{matrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

De esta matriz se desprende una red más compleja que involucra no sólo a los componentes que configuran a x_1, sino además, las relaciones que existen entre todos los componentes necesarios en un segundo plano para formar al mismo bien x_1. La gráfica es la siguiente:

Fig. 35. Relaciones de primer y segundo nivel para la composición del bien x_1



Esto significa, que aunque en nuestro supuesto inicial de que K=1, sólo se verifica en un primer plano de análisis, es decir, cuando se analizan exclusivamente los componentes inmediatos a la configuración de un bien x_1=(x_2, x_3, a_1, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2, r_3). En realidad en cualquier sistema que tenga alguna recursividad se presenta una red más densa de múltiples interconexiones. Representada en nuestro ejemplo en la matriz ampliada de componentes.

Esta matriz es una aproximación a la matriz de parámetros de diseño que se explicó en el capítulo anterior, la cual representa características físicas que definen al artefacto (color, dimensiones, material, etc.) y puede representarse en forma de una cadena de la siguiente forma general X_1=(1,0,&,#) donde el elemento que contiene el número 1 representa la existencia de cualquier característica, el 0 que no contiene esa característica, el & que puede o no contenerla pero no es relevante para el diseño o configuración específica del bien y # que no importa si contiene o no el resto de las características. Sin embargo, como se puede inferir de nuestro razonamiento, es posible extender al análisis a niveles jerárquicos más bajos hasta llegar por ejemplo a los

elementos periódicos o a los componentes atómicos, sin embargo, este ejercicio sería inútil y conviene detenerse en un análisis cercano a la vecindad del artefacto a analizar, sin olvidar que es sólo una aproximación conveniente pero no una descripción exhaustiva.

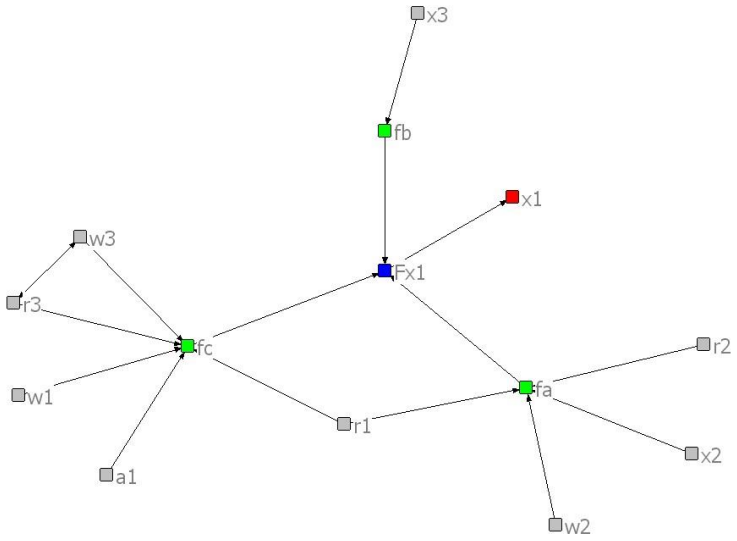
Ahora, las relaciones que se observan en los componentes no son casuales, cada nodo o *subconjuntos de nodos*, generan una función específica que da sentido al artefacto final para el que fue diseñado (con el cierto, pero como se verá más adelante, endeble, contenido teleológico implícito). Así, por ejemplo, una articulación arbitraria de los componentes puede realizarse de la siguiente forma: x_2, w_2, r_1, r_2 generan la función f_a del bien x_1; x_3 la función f_b; y a_1, w_1, w_3, r_1, r_3 la función f_c. A su vez, la articulación de dichas funciones genera por lo menos una función final que satisface las necesidades de alguna población de agentes. Así, la secuencia para el ejemplo del bien $x_1$es la siguiente:

Fig. 36. Secuencia de componentes y funciones del bien x_1 para satisfacer S_i

$$x_1=\begin{bmatrix} x_2 \\ x_3 \\ a_1 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \xrightarrow{genera} fx_1=\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \xrightarrow{genera} Fx_1 \xrightarrow{satisface} S_i(1,0,\&,\#)$$

Donde, x_1 es el bien a analizar, compuesto por los componentes x_2, x_3, a_1, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2, r_3 que a partir de sus relaciones generan un vector de funciones fx_1 las cuales a su vez generan una función final, Fx_1 que satisface las necesidades de un conjunto de agentes S_i. Según nuestra articulación arbitraria la red que genera es la siguiente:

Fig. 37. Relaciones de componentes y funciones del bien x_1



Note que las combinaciones entre componentes y funciones pueden incluir todos los casos posibles. Un componente genera una sola función ($x_3 \rightarrow f_b$); varios componentes *independientes* entre sí generan una función (r_2, x_2, w_2, $r_1 \rightarrow f_a$); un componente (solo o con otros componentes) genera una o más funciones ($r_1 \rightarrow (f_a, f_b)$); dos o más componentes *interdependientes* (solos o con otros componentes) generan una función (w_1, a_1, (r_3, w_3) $\rightarrow f_c$); etcétera. Desde luego, la función final puede ser un nuevo vector de funciones sucesivas que similar al caso de la jerarquía hacia abajo, se puede presentar una hacia arriba sin límite superior, sin embargo, por el mismo argumento didáctico no se extiende más, aunque no debe ser olvidada esta posibilidad.

Presentada toda la estructura básica del modelo conviene ahora incorporar algunos elementos del cuerpo de la teoría de la innovación, para ello comenzaremos observado los cambios que suceden en el sistema a partir de dos mecanismos: el llamado *demand pull*, representado en este modelo a partir de cambios en el uso de las funciones de los bienes por parte de los consumidores y el *tecnology push*, representado en este caso como una mutación en las tecnologías o componentes generado por tres fuentes distintas: a) economía de recursos, b) incremento de mercados y c) cambios en las fuerzas productivas naturales (variaciones en los recursos libres). En ambos casos se describirán los procesos de adaptación y los cambios en todo el sistema.

4.5. DEMAND PULL

Aunque generalmente los artefactos son utilizados a partir de la propia función para la que fueron diseñados, el uso final sólo lo determina el consumidor, *i.e.* una taza puede ser usada para contener líquidos (objeto para el que fue diseñado originalmente), sin embargo, el usuario puede destinarla para guardar plumas o lápices, como pisapapeles o cualquier otra función que sus condiciones físicas le permitan. Por otro lado, los artefactos que existen no necesariamente satisfacen del todo los requerimientos preexistentes o sufren ligeros cambios por múltiples razones (momentáneas o de tendencia sistemática) por parte de los usuarios.

Cualquiera de estas dos fuentes genera un cambio para el cual los agentes proveedores de los bienes o servicios pueden hacer modificaciones que les genere un nivel de adecuación mayor. Esto se realiza bajo el siguiente mecanismo.

Hasta ahora, en la formación de reglas, simplemente se han incorporado un ejemplo que ilustra la detección de bienes o servicios más adecuada a partir de una valuación exógena. Esta formación de reglas, como se mencionó arriba, puede incorporarse en distintos niveles, por ejemplo, la detección de preferencias por parte de los agentes. En las líneas anteriores, la valuación que determinaba el grado de adecuación de la regla de detección se podría entender de forma similar a las "preferencias reveladas": si adquieren el bien o servicio, significa que de alguna forma le resulta útil. Sin embargo, esta solución de mercado no arroja más información para detectar cambios en las preferencias de los agentes o productos. Para hacerlo se incorporará la relación función-componente que ha sido explicada.

Los agentes requieren satisfacer ciertas necesidades para garantizar su propia reproducción, dichas necesidades pueden describirse en una cadena binaria que representen las funciones requeridas y brindadas por algún componente (bien o servicio). Es decir, exista ahora de forma similar a las cadenas antes descritas una que representa las necesidades de las poblaciones humanas y de las empresas productoras de bienes y de tecnología de las siguientes formas generales respectivamente:

Cadena 5 Necesidades de los agentes

Sh_i (1, 0, #, &)
Se_i (1, 0, #, &)
Set_i (1, 0, #, &)

Cada bien, servicio o recurso natural, satisface alguna necesidad o requerimiento de los distintos agentes. Ahora, en caso de las necesidades humanas, concentrándonos exclusivamente en las necesidades funcionales provistas por los bienes adquiridos, los agentes pueden hacer el ejercicio de abstraer ciertas propiedades de los bienes existentes para satisfacer con un mismo bien más de una función, lo que a la postre y bajo ciertas circunstancias que abajo se explicarán, repercutirá en a) la generación de un nuevo bien o b) en la sustitución de un bien por otro.

Así por ejemplo, un agente humano puede tener la siguiente cadena de necesidades:

S_{h1} (1, 1, 1, #, 0, 0, &, &, &)

Donde el bien x_1, satisface la necesidad colocada en la primera posición de la cadena, el bien x_2 la segunda posición y el bien x_3, la tercera. La posición 4 puede o no ser relevante para el agente, la siguientes dos posiciones señaladas con ceros significan que no son satisfechas por ningún bien, y las tres últimas que no son necesidades relevantes para el agente. En este ejemplo tenemos entonces que este agente al detectar y utilizar los bienes x_1, x_2, x_3 satisface tres necesidades, (o visto desde otra perspectiva, dichos artefactos cumplen con tres funciones diferentes que son requeridas por y satisfechas para el agente). Sin embargo, existen al menos dos necesidades (las que han sido etiquetadas con ceros) que son relevantes para el agente y que no son satisfechas por ningún artefacto existente. Es decir, no existe ningún artefacto que cumpla con las funciones necesarias para satisfacer esas necesidades.

Ahora, si se asumen que el agente es capaz de abstraer de uno de los bienes sus respectivas funciones y utilizarlas para satisfacer alguna otra necesidad (por ejemplo, utilizar la taza como un portalápices) a partir de bloques de construcción, entonces, por medio de un proceso de ensayo y error es capaz de descubrir reglas para el uso diverso de los bienes de la forma:

SI fx_1 (1, #, #) ENTONCES Sh_1 (1, #, #, #, 1, 0, &, &, &)
SI fx_1 (#, 1, #) ENTONCES Sh_1 (1, #, #, #, 1, 0, &, &, &)
SI fx_1 (#, #, 1) ENTONCES Sh_1 (1, #, #, #, 1, 0, &, &, &)

Donde, los argumentos de fx_1 son f_a, f_b y f_c, ordenados en la primera, segunda y tercera posición respectivamente. Esto resumidamente se lee para primera hipótesis, SI la función f_a se encuentra en x_1 ENTONCES satisface la necesidad 1 y la necesidad 5; para la segunda, SI la función f_b se encuentra en x_1 ENTONCES satisface la necesidad 1 y la necesidad 5; y para la tercera, SI la función f_c se encuentra en x_1 ENTONCES satisface la necesidad 1 y la necesidad 5. Y como se explicó de la formación de reglas se desprende una tabla de valores que determina una jerarquía de uso en las mismas, de tal modo, que si alguna de estas hipótesis obtienen una valuación que satisfaga la necedad que antes no era cubierta, entonces la regla comenzará a utilizarse, así la tabla de asignación de crédito que se desprende puede ser la siguiente:

Tabla 14. Valores de las hipótesis que identifican a las funciones del bien x_1 con la quinta necesidad de h_1

N	Regla		Valor
1	1 # # 1 # # # 1 0 & & &		4
2	# 1 # 1 # # # 1 0 & & &		1
3	# 0 1 1 # # # 1 0 & & &		0
Fuerza promedio= 5/3			

Puesto que la regla (1, #, #, 1, #, #, #, 1, 0, &, &, &) tiene una fuerza de asignación de crédito mayor que el promedio, entonces podría comenzar a utilizarse, pero como se explicó anteriormente esto no necesariamente garantiza que sea la regla dominante, por lo tanto, es necesario realizar un proceso de cruzamiento de reglas para determinar si la utilizada es en efecto la que tiene el mayor nivel de adecuación posible en un espacio de exploración relativamente extenso. Así, de forma aleatoria se cruzan las reglas de donde resulta la siguiente tabla:

Tabla 15. Valores del cruzamiento de la mejor hipótesis de identificación de las funciones de x_1 para satisfacer la quinta necesidad de h_1

N	Regla progenitora	La regla	Cruza en	Con la regla	Regla descendiente	Valor
1	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	1	4	2	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	4
2	# 1 # 1 # # # 1 0 & & &				# 1 # 1 # # # 1 0 & & &	1
2	# 1 # 1 # # # 1 0 & & &	2	2	3	# 1 1 1 # # # 1 0 & & &	1
3	# 0 1 1 # # # 1 0 & & &				# 0 # 1 # # # 1 0 & & &	0
1	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	1	5	3	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	4
3	# 0 1 1 # # # 1 0 & & &				# 0 1 1 # # # 1 0 & & &	0
1	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	1	6	2	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	4
2	# 1 # 1 # # # 1 0 & & &				# 1 # 1 # # # 1 0 & & &	1
1	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	1	7	2	1 # # 1 # # # 1 0 & & &	4
3	# 0 1 1 # # # 1 0 & & &				# 0 1 1 # # # 1 0 & & &	0
2	# 1 # 1 # # # 1 0 & & &	2	1	3	# 0 1 1 # # # 1 0 & & &	0
3	# 0 1 1 # # # 1 0 & & &				# 1 # 1 # # # 1 0 & & &	1

Fuerza media= 5/3

De esta tabla se puede observar que efectivamente la regla (1, #, #, 1, #, #, #, 1, 0, &, &, &) tiene una fuerza de adecuación mayor que el promedio y por lo tanto se puede concluir que la función f_a satisface tanto a la primera como a la quinta necesidad del agente Sh_1. Esto evidentemente tiene efectos económicos importantes en términos de la demanda de los distintos bienes, lo cual será discutido más adelante. Por el momento, es relevante mencionar algunos elementos significativos que se pueden observar de este ejemplo:

a) El agente es capaz de abstraer el total o algunas funciones y utilizar un artefacto con otros usos distintos para el que fue diseñado, de tal modo que el carácter teleológico del diseño de un artefacto es permanentemente afectado y basta con una sola aplicación diferente para debilitar dicho carácter.

b) La posibilidad de abstracción del agente descansa sobre su capacidad de separar en bloques de construcción (o por la aplicación de operadores modulares) las

funciones propias del artefacto y destinarlas para el uso de otra necesidad de tal forma que soluciona un problema alternativo.

c) Como se puede observar, el uso alternativo del artefacto radica en sus funciones más que en sus componentes, esto es particularmente relevante puesto que por un lado el agente no necesita conocer ni la tecnología, ni los recursos utilizados para la construcción del artefacto para destinarlo a la satisfacción de otras necesidades y por otro lado, esta consideración deja al productor del artefacto las condiciones para su modificación. Así, mientras que prioritariamente el usuario concentra el poder de aplicación del artefacto, el productor prioritaria pero no exclusivamente tiene la capacidad de transformarlo en generaciones subsecuentes. Desde luego, así como el agente es capaz de separar en bloques de construcción las funciones del artefacto, también cabe la posibilidad de que abstraiga la matriz ampliada de componentes y así hasta la propia matriz de diseño del artefacto, sin embargo, ello requiere de conocimientos o ensayos múltiples que pueden en principio resultarle altamente costosos.

La posibilidad de que el agente realice esta adición en las funciones del artefacto, le permite además generar un regla aún más amplia en la que ahora cada bien que obtenga tiene intrínsicamente la posibilidad de ser utilizado para múltiples funciones adicionales a la satisfacción de la necesidad original por el que fue adquirido y por lo tanto, es capaz de generar una meta-regla para el uso de los objetos. Dicha meta-regla al igual que el resto se forma a partir de la experiencia poniendo a competir distintas hipótesis (por ejemplo, concentrarse en una necesidad no satisfecha y determinar si alguna o alguna de las funciones que tienen de los objetos ya existentes puede satisfacerla o utilizar permanentemente los operadores modulares sobre las funciones de los objetos ya existentes para determinar si satisface alguna otra necesidad, etcétera). Cualquiera que sea la meta-regla que domine en el comportamiento del agente, su existencia misma crea condiciones de cambio permanente en el conjunto del sistema.

Ahora, por otro lado, el hecho de que un agente satisfaga por lo menos una necesidad adicional con el mismo objeto repercutirá en la demanda del mismo independientemente de que se presente un efecto sustitución o no del resto de los bienes. Este incremento en la demanda será naturalmente identificado por el proveedor

de dicho bien, sin embargo, no necesariamente puede determinar el origen de su cambio puesto que es ciego ante la práctica que realiza el usuario final, de tal modo que puede confundir el crecimiento de la demanda de su bien por un crecimiento propio de la tasa de población que lo demanda, en lugar de un cambio provocado por un factor cualitativo. Así, si el productor del bien es capaz de identificar el cambio en su demanda es por razones de la extensión de uso de las funciones del bien que realiza entonces, tendrá la posibilidad de rediseñar el bien y en consecuencia generar una nueva línea de productos que satisfacen una nueva necesidad y en consecuencia innovar un nuevo bien. Esto lo puede hacer lanzando un conjunto de hipótesis que de nuevo verifica con la experiencia bajo un procedimiento de dos fases, en la primera determinará el uso o usos del bien a partir de sus funciones y en la segunda rediseñara los componentes de bien para diversificar o concentrar la funciones para la creación de una nueva generaciones de bienes. Así, en la primera lanza un conjunto de detectores para identificar el uso de las funciones:

SI dex_1(1, #, #) ENTONCES Sh_1((1, #, #, #, 1, 0, &, &, &)
SI dex_1 (#, 1, #) ENTONCES Sh_1 (1, #, #, #, 1, 0, &, &, &)
SI dex_1 (#, #, 1) ENTONCES Sh_1 (1, #, #, #, 1, 0, &, &, &)

Que como se puede observar es exactamente el mismo problema que resolvió el usuario con la diferencia de que en lugar de determinar un nuevo uso de la función para satisfacer una necesidad, se detecta cuál es la función que utilizó el agente para satisfacer dicha necesidad. Los resultados tras la valuación son evidentemente los mismos.

En una segunda fase, el productor del bien puede hacer un análisis del diseño del producto y realizar las modificaciones a partir de su matriz ampliada de componentes y lanzar un nuevo producto, así, ya habiendo identificado el área donde puede o no realizar las modificaciones lanza un conjunto de hipótesis en forma de un nuevo producto con base en el producto progenitor x_1 = (0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) que como se recordará es la secuencia para los genes (x_1, x_2, x_3, a_1, a_2, a_3, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2, r_3) que representa todos los bienes y recursos existente en la economía. Así siguiendo con nuestro ejemplo del bien x_1 las hipótesis que pueden lanzarse considerando que cada una de las funciones se articulan con los siguientes componentes:

$f_a=(x_2, r_1, r_2, w_2)$
$f_b=(x_3)$
$f_c=(a_1, w_1, r_1, (r_3, w_3))$

Son las siguientes:

SI (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_1 (#, #, #, #, 1, #, &, &, &)
SI (0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_1 (#, #, #, #, 1, #, &, &, &)
SI (0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0) ENTONCES Sh_1 (#, #, #, #, 1, #, &, &, &)
SI (0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_1 (#, #, #, #, 1, #, &, &, &)

Donde en el primer caso, se elimina el bien x_3 y por lo tanto la función f_b en su totalidad, en la segunda, se sustituye la tecnología a1 por la tecnología a_2, alterando la función f_c, en la tercera se elimina el componente (r_3, w_3) alterando la función f_c y en la cuarta se elimina w_1 alterando de nuevo a f_c. Observe que ninguno de los componentes que conforman la función f_a fueron afectados puesto que es precisamente ésta la que garantiza la satisfacción de la quinta necesidad de Sh_1.

Realizando la evaluación práctica, el agente proveedor del bien x_1 modificado descubre la siguiente tabla de asignación de crédito:

Tabla 16. Valores de las hipótesis por generar el bien x_1 modificado

N	Regla		Valor
1	0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, #, #, #, 1, #, &, &, &		4
2	0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, #, #, #, 1, #, &, &, &		0
3	0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, #, #, #, #, 1, #, &, &, &		0
4	0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, #, #, #, #, 1, #, &, &, &		1
Fuerza promedio= 5/4			

Donde la primera regla es la que tiene el mayor valor y se asume que haciendo los cruces respectivos se mantiene como regla dominante. Por lo tanto, el proveedor del bien x_1, descubre que si elimina el componente x_3, y la función f_b que la acompaña, crea el bien $x_{1.1}$ que satisface exclusivamente una nueva necesidad que antes no era satisfecha.

De esto se desprenden tres puntos centrales. El primero es que el proceso de innovación de producto aunque puede tener una fuente desde el lado del consumidor, es primordialmente el productor el que puede generar un nuevo bien a partir del conocimiento que tiene de las relación entre función y componentes; el segundo es que la incorporación de un nuevo bien desde luego alterara el conjunto del sistema económico puesto que habrá efectos sustitución que reconfigurarán la totalidad del sistema (tema que se analizará más adelante) y finalmente, el producto resultante de la innovación es en realidad un producto cercano y vinculado de algún modo a uno anterior creando con ello trayectorias de dependencia (*path dependence*) a partir de las relaciones función componente y posibles efectos de encerramiento (*lock-in*).

El resultado en términos de la generación de un nuevo bien es siguiente:

$$x_1 = (0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$$
$$x_{1.1} = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$$

Donde sólo un pequeño cambio implica un cambio en el conjunto del sistema.

4.6. TECHNOLOGY PUSH.

Analizado ya el cambio dirigido por la demanda ahora conviene analizar por el lado de la oferta de los bienes y como se determinó arriba esto puede ser producto de tres casos:

a) Economía de recursos. Esto es, modificar los recursos disponibles para reducir su uso y costos incorporados.

b) Incremento de los mercados. Esto es, realizar cambios marginales en los productos de tal modo que sean colocados en nuevos mercados.

c) Cambios en las fuerzas productivas naturales. Cambios exógenos que hacen variar los recursos disponibles en la economía.

4.6.1. Caso 1. Economía de recursos.

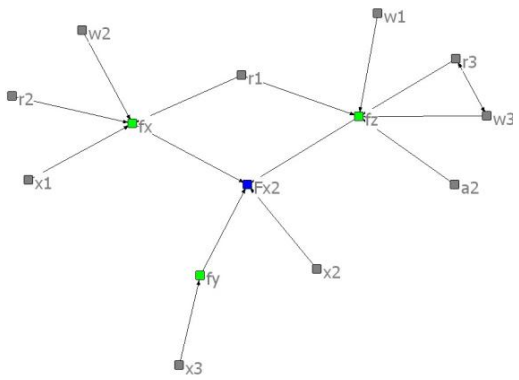
Para analizar estos tres elementos se utilizará de nuevo un ejemplo tomando ahora como eje al bien x_2. Similar al ejemplo anterior el bien tiene ciertas funciones que

se desprenden de sus componentes. En este caso, arbitrariamente se determinaran las funciones de la siguiente forma:

$Fx_2 = (f_x, f_y, f_z)$ donde
$f_x = (x_1, w_2, r_1, r_2)$
$f_y = (x_3)$
$f_z = (a_2, w_1, (r_3, w_3))$

Y gráficamente se muestra como:

Fig. 38. Relación de componentes y funciones del bien x_2



El productor al conocer las funciones y los componentes que las determinan puede intentar hacer modificaciones que le reduzcan costos, como sabe, en este caso, que x_3 determina exclusivamente la función f_y, por tanto, difícilmente la cambiaría, así su experimentación la podría realizar para las funciones f_x o f_z. Si inicialmente comienza con f_x puede lanzar las siguientes hipótesis para el bloque de construcción (x_1, r_2, r_1, w_2):

SI $f_x(1, 1, 1, 1)$ ENTONCES F_{x2} (1, #, #)
SI $f_x(1, 0, 1, 1)$ ENTONCES F_{x2} (1, #, #)
SI $f_x((1, 1, 1), 0)$ ENTONCES F_{x2} (1, #, #)
SI $f_x(0, 1, (1, 1))$ ENTONCES F_{x2} (1, #, #)

Donde la primera regla es la que ha venido utilizando, y en las siguientes se eliminan componentes y se crean nuevos a partir de la combinación de los ya existentes.

Así, la tabla de asignación de crédito (que incluye tanto las reglas progenitoras como algunas descendientes) puede quedar de la siguiente forma:

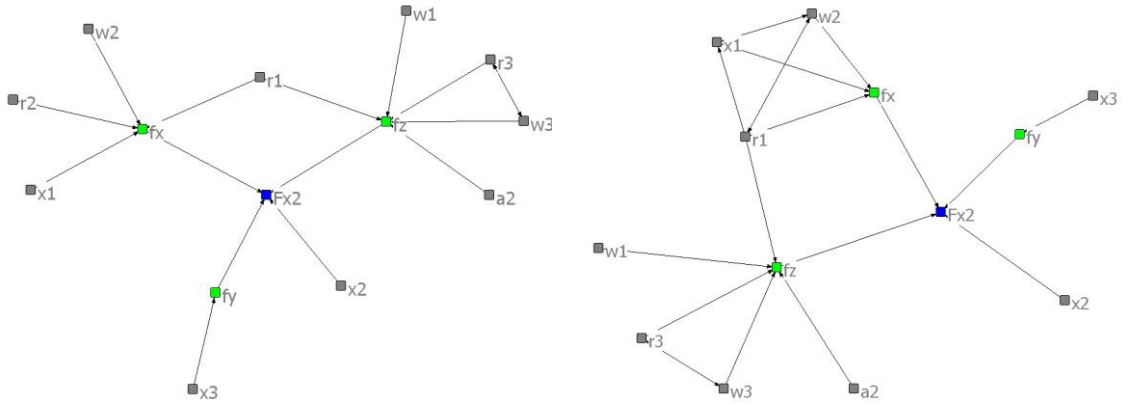
Tabla 17. Valores de las hipótesis de cambios en las funciones de F2 incluyendo cruzamientos

N	**Regla progenitoras**				**Valor**
1	1, 1, 1, 1, 1, #, #				4
2	1, 0, 1, 1, 1, #, #				2
3	(1, 1, 1), 0, 1, #, #				4
4	0, 1, (1, 1), 1, #, #				2
	Reglas descendientes	**La regla**	**Cruza en**	**Con la regla**	
5	1, 1, 1, 1, 1, #, #	1	5	4	4
6	1, 0, 1, 0, 1, #, #	2	3	3	2
7	(1, 1 (1) 1), 1, #, #	3	4	4	3
8	1, 1, 1, 1, 1, #, #	1	2	2	4
9	1, 0, (1, 1), 1, #, #	2	2	4	3
Fuerza promedio= 3.11					

De este resultado se observa que en efecto, la regla original se sigue encontrando sobre el promedio del conjunto de las reglas, sin embargo, la tercera regla es igualmente poderosa y sus descendientes aunque son altas se encuentran debajo del promedio. Así, el productor puede eliminar el componente r_2 y sustituirlo por un nuevo componente compuesto por (x_1, w_2, r_1) sin que se afecte la función f_x, logrando con ello un ahorro de dicho recurso.

Si los costos incorporados en el recurso r_2 son mayores que los incorporados en el resto de los recursos que se utilizan ahora para sustituirlo, entonces el bien x_2 se transforma de la cadena (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) a la cadena (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) con los respectivos vínculos que se pueden observar en la siguiente figura:

Fig. 39. Representación del cambio de componentes del bien x_2



Huelga decir, que similar a la función a la función f_x se pueden explorar cambios en la función f_z donde los resultados pueden o no ser transformaciones en el bien. Note además, que a diferencia del caso anterior, no se genera un nuevo bien desde la perspectiva del usuario final (el bien x_2 sigue siendo el bien x_2) puesto que sigue cumpliendo con la función final para el que fue diseñado, así, la capacidad de transformación del bien radica exclusivamente en el productor y esto a su vez implica un hecho fundamental de doble carácter:

a) El usuario desconoce a detalle los principios de diseño del bien que consume, sin embargo, sabe que su uso le reporta alguna utilidad.

b) La falta de información de ambos agentes (detalles de diseño y uso final) genera un problema de agente-principal de ambos lados.

4.6.2. Caso 2. Innovación por incremento de mercados.

Este es un caso que combina los ejemplos anteriores tanto en el hecho de que el agente oferente del bien explora nuevos ambientes como en el hecho de que puede o no alterar las funciones finales del bien. Esto es, el agente oferente de bienes supone a partir de tres criterios a saber, espacio físico, tiempo y necesidades, que:

a) Existen necesidades que no han sido satisfechas por lo que algunas modificaciones en los bienes que ofrecen pueden hacerlo (mismo espacio, mismo tiempo, distintas necesidades)

b) El cambio en el tamaño o características de las poblaciones para las que ya ofrece sus bienes generarán distintas demandas en el futuro (mismo espacio, distinto tiempo, distintas necesidades); o

c) Hay espacios distantes que pueden requerir el bien en su funcionalidad primordial para satisfacer sus necesidades pero que necesita de algunas modificaciones para permitir su acceso (distinto espacio, mismo tiempo, misma necesidad).

Siguiendo con nuestro ejemplo para el bien x_2, el agente oferente del bien de nuevo lanza un conjunto de hipótesis sobre las necesidades de los agentes consumidores de su bien con base en ideas preconcebidas sobre ellas y sus propias posibilidades de cubrirlas. La fuente de preconcepción de dichas ideas es múltiple: producto de la experiencia, a partir de la información que le dan sus consumidores o proveedores, con base en estudios de mercado, etcétera. Cualquiera de sea la fuente, en realidad lo único que hace es reducir el espacio de acción sobre el lanzamiento de sus hipótesis, es decir, reduce el espacio de exploración. Este espacio se acota aún más a partir del propio conocimiento que tiene de su producto o tecnología con base en la plausibilidad de hacer modificaciones que pueda hacer de su producto.

Así, por ejemplo, si la cadena de necesidades del agente humano que consume el bien x_2 es:

$$S_{h2}\ (1, 1, 1, \#, 0, 0, \&, \&, \&)$$

El proveedor del bien x_2 concentra su atención sólo en las áreas en las que puede incidir, en este caso en las necesidades no satisfechas colocadas en las posiciones 5 y 6 de la cadena. Ahora si por ejemplo, sabe que su producto por más modificaciones que le haga no satisface alguna de las necesidades, por ejemplo, la quinta (porque *i.e.* su producto satisface alimentación y la quinta se refiere a transporte, difícilmente podrá satisfacerla) entonces, explorará en otras en las que si pueda hacer modificaciones, en este caso la sexta.

De nuevo, la funciones del bien x_2 son las siguientes:

$Fx_2 = (f_x, f_y, f_z)$ donde
$f_x = (x_1, w_2, r_1, r_2)$
$f_y = (x_3)$
$f_z = (a_2, w_1, (r_3, w_3))$

El oferente del bien lanza un conjunto de hipótesis para resolver el problema:

SI (1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &)
SI (1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &)
SI (1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &)
SI (1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &)

Donde el producto original y algunas modificaciones satisfacen tanto a la necesidad que ya venía resolviendo (la segunda posición) como la nueva necesidad identificada (la sexta posición). De aquí se desprende la siguiente tabla de asignación de crédito que incluye tanto las reglas progenitoras como las descendientes:

Tabla 18. Valores de las hipótesis que lanza el proveedor del bien x_2 para satisfacer la sexta necesidad del agente h_2

N	**Regla progenitoras**				**Valor**
1	1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &				1
2	1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &				0
3	1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &				4
4	1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &				1
	Reglas descendientes	**La regla**	**Cruza en**	**Con la regla**	
5	1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &	1	5	4	1
6	1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &	2	3	3	0
7	1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &	3	4	4	3
8	1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &	1	2	3	1
9	1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, #, 1, #, #, #, 1, &, &, &	2	6	4	1
Fuerza promedio= 1.33					

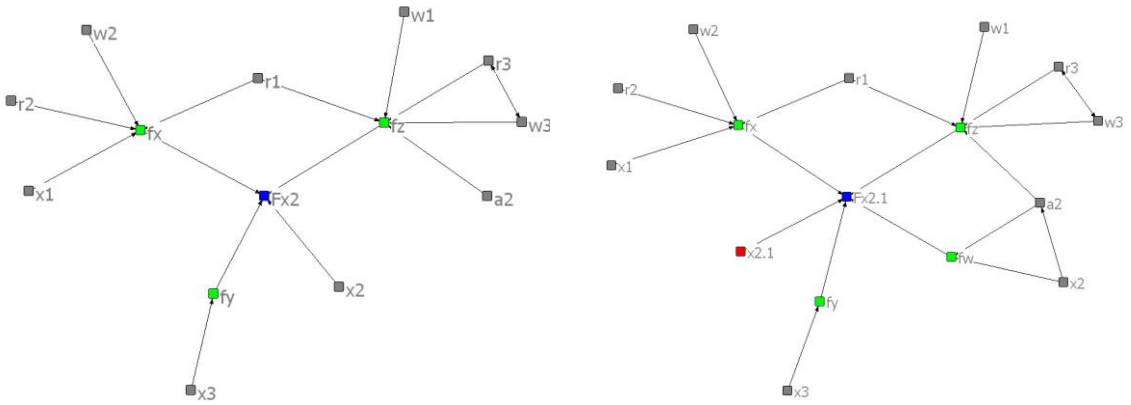
De estas reglas sólo dos se encuentran sobre la fuerza promedio, la tercera y la séptima SI (1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &) y SI (1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &) de donde se observa que es la incorporación del componente x_2 correspondiente a la segunda posición de la primera parte de la hipótesis de ambas reglas y la sustitución de la tecnología a_2 por la a_3 en el caso de la segunda hipótesis, son las que generan un mayor nivel de aptitud. La explicación de esto, puede residir en que la incorporación del bien x_2 y sus posibles enlaces con el resto de los elementos, genera un nuevo componente y con ello una nueva función que satisface la sexta necesidad del agente Sh_2.

En consecuencia, se genera un nuevo bien $x_{2.1}$ que ahora incorpora al viejo x_2 como un insumo más que como un producto final, con la correspondiente transformación de las funciones:

$Fx_{2.1} = (f_w, f_x, f_y, f_z)$ donde
$f_w = (x_2, a_2)$
$f_x = (x_1, w_2, r_1, r_2)$
$f_y = (x_3)$
$f_z = (a_2, w_1, (r_3, w_3))$

Que satisface tanto la segunda como la sexta necesidad del agente Sh_2. Gráficamente este cambio se puede ilustrar con la siguiente figura:

Fig. 40. Representación del cambio componente y función del bien x_2



Naturalmente podría ensayarse también la segunda regla, sin embargo, los resultados no variarían esencialmente. En este ejemplo, es importante resaltar tres hechos fundamentales:

a) La innovación no es resultado de una necesidad que el usuario demanda, sino una exploración que hace el productor por satisfacer dicha necesidad. Es decir, se presenta un carácter proactivo desde el lado del oferente a partir de sus preconcepciones y previsiones.

b) El oferente no crea un nuevo producto sustituyendo todos los componentes y funciones, sino que lo hace en la vecindad y a partir del conocimiento previo que tiene del bien que oferta, lo que de nuevo está determinado por trayectorias de dependencia.

c) Al tratar de satisfacer distintas necesidades, el bien se vuelve más complejo (ilustrado aquí como la generación de una nueva función f_w y un nuevo vinculo de los componentes (x_2 y a_2). Esto hace de facto que se integren cada vez más las funciones (por ejemplo, si se intenta modificar por cualquier motivo a a_2, esto implicaría cambios tanto en f_w como en f_z) lo cual implica la generación de fenómenos de encerramiento (*lock-in*). Si las relaciones (vinculaciones) aumentan incluso podría pensarse en una función mayor compuesta por varias funciones, volviendo cada vez más integral al sistema. Este fenómeno y sus implicaciones se analizarán a detalle más abajo.

4.6.3. Caso 3. Cambios en las fuerzas productivas naturales.

Hasta ahora, los casos de innovación se han presentado por características endógenas de sistema a partir de las relaciones entre los agentes, sin embargo, puede presentarse el caso de alguna variación exógena que altere las condiciones del conjunto del sistema, por ejemplo, el agotamiento de uno de los recursos que se consideraban libres (i.e. r_2)[58]. Así, podría observarse una mutación en las condiciones de los recursos

[58] Se retoma de la noción Marxista de las Fuerzas Productivas del Trabajo la cual *"está determinada por múltiples circunstancias, entre otras, por el nivel medio de destreza del obrero, el estadio de desarrollo en que se hallan la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas, la coordinación social del proceso de producción, la escala y la eficacia de los medios de producción,* las condiciones naturales*."* (Marx, 1975, p.49) el hecho de que los cambios en las condiciones de la naturaleza afectan el sistema económico. Para nuestro caso se considerará como una variación exógena sin embargo, no debe olvidarse que en el estudio de la Economía Ecológica los agotamientos en los recursos naturales son considerados como un fenómeno propio del proceso económico, lo cual es cierto y puede fácilmente incorporarse en el presente modelo, sin embargo, desviaría el objetivo de la presente investigación.

pasando la cadena de recursos de (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1) a (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1) correspondiente a (x_1, x_2, x_3, a_1, a_2, a_3, w_1, w_2, w_3, r_1, r_2, r_3).

Esto traerá como consecuencia un efecto en todos los bienes, pues todos requieren de dicho recurso. Para este punto es fácil imaginar que el efecto será que los oferentes harán variaciones en sus componentes para mantener las funciones de sus bienes, eliminando el recurso r_2, los resultados como se verá serán variados. Como se determinó arriba, el recurso r_2 afecta a los distintos bienes de la siguiente forma:

Fig. 41. Relaciones del recurso r2 con los bienes, insumos o servicio.

El agente:	Que oferta:	Requiere del bien, insumo o servicio:											
e_1	x_1		x_2	x_3	a_1			w_1	w_2	w_3	r_1	r_2	r_3
e_2	x_2	x_1		x_3		a_2		w_1	w_2	w_3	r_1	r_2	r_3
e_3	x_3	x_1	x_2				a_3	w_1	w_2	w_3	r_1	r_2	r_3
te_2	a_2			x_3			a_3		w_2			r_2	

De tal forma que la eliminación de este recurso afecta directamente a los bienes x_1, x_2, x_3 y a_2. En consecuencia, se estudiará el efecto sobre cada uno de los bienes sin hacer cada uno de los desarrollos para no volver engorroso o confuso el tema.

4.6.3.1. Efecto sobre x1.

Puesto que x_1 requiere de r_2 el oferente de este bien analiza cual es la relación que mantiene en su producto de tal forma que observa sus funciones e identifica que afectará a la función:

$f_a=(x_2, r_1, r_2, w_2)$

De tal forma que se preguntará si es posible sustituir este componente para mantener la misma función. Sin desarrollar el ejemplo, el resultado es positivo, si

sustituye los componentes r_2 y x_2 por un componente formado por (a_3, x_3 y w_1) la función f_a se mantiene y por lo tanto todo el bien e incluso el bien $x_{1.1}$ sobreviven a este cambio. Así, las nuevas cadenas pasarán de:

x_1= (0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) a x_1=(0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1)
$x_{1.1}$= (0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) a $x_{1.1}$= (0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1)

Como se determinó arriba para pasar de x_1 a $x_{1.1}$ solo se eliminaba el componente x_3 y la función f_b que le resultaba, en este caso, el agente vuelve a utilizar el bien x_3, pero ahora en combinación con a_3 y w_1 generan la función f_a quedando:

f_a=(r_1, w_2, (x3, a3, w1))

Y por lo tanto ambos bienes sobreviven.

4.6.3.2. Efecto sobre x_2, $x_{2.1}$, a_1 y a_2.

Como se recordará en el ejemplo del Caso 1. Economía de recursos, fue precisamente el recurso r_2 el que se eliminaba, por lo tanto, el efecto sobre el bien x_2 es positivo ya que haciendo los cambio necesarios en sus componentes el agente proveedor de este bien ahorrará en este recurso. Sin embargo, tanto x_2 como $x_{2.1}$ requieren de a_2, tecnología que es afectada por r_2. Así si:

$a_2 = Fa_2 = (x_3, a_3, w_2, r_2)$

De nuevo el agente que provee de esta tecnología investiga si es posible sustituir r_2 por cualquier otro componente. En este caso sin realizar el desarrollo la respuesta es negativa y en consecuencia la población de a_2 también se elimina. Esto hecho afecta por tanto a x_2, a $x_{2.1}$ pero también a a1 que como se recordará depende de x_2, a_2, w_2 y r_2.

Así, regresando al caso de x_2, de nuevo se prueba la posibilidad de que sobreviva pero ahora sin a_2, la respuesta es positiva sustituyendo esta tecnología por un componente integrado en la función f_z por x_3, a_3 w_1 y w_2.

En el caso del bien $x_{2.1}$, la respuesta también es positiva, pero con algunas correcciones más amplias. Ya que a_2 no solo afectaba la función f_z sino también a f_w, no es posible resolver el problema con la regla dominante, sin embargo, $x_{2.1}$ aún puede

sobrevivir puesto que si bien la regla dominante era SI (1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &), también la regla SI (1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) ENTONCES Sh_2 (#, 1, #, #, #, 1, &, &, &) se encontraba sobre la fuerza promedio, en consecuencia, si se utiliza ahora esta regla y se hacen los cambios en la función de $f_x = (x_1, w_2, r_1, r_2)$ a $f_x = (x_1, w_2, r_1)$ similar al bien x_2, puede mantenerse el bien $x_{2.1}$. Esto es posible puesto que el oferente del bien x_2 es el mismo que el oferente del bien $x_{2.1}$ y tiene este conocimiento como resultado de una experimentación previa.

Cabe preguntarse ahora si a_1 puede sobrevivir y la respuesta es positiva si se integra un componente compuesto por w_2 y r_3.

4.6.3.3. Efecto sobre x_3.

En este caso, las funciones son las siguientes:

$x_3 = Fx_3 = (f_m, f_n, f_{\tilde{n}})$ donde
$f_m = (x_1, a_3)$
$f_n = (x_2, w_1, w_2, r_1, r_2)$
$f_{\tilde{n}} = (w_3, r_3)$

Si se elimina r_2, el agente descubre que no se afecta f_n y en consecuencia tampoco a Fx_3, por lo tanto, r_2 era un recurso innecesario y no requiere hacer ningún cambio permitiendo que se ahorre de dicho.

En resumen, un agotamiento del recurso r_2 afecta a todo el sistema con resultados diversos, en el caso de los bienes x_1, $x_{1.1}$ y a1 su supervivencia se logra haciendo arreglos en sus componentes que implica ahorro del recurso r_2 pero un mayor gasto en otros. En el caso de x_2, en primera instancia se hubiera logrado un ahorro propio del Caso 1 de innovación por economía de recursos, sin embargo, como se afectó también a a_2, requirió de un reacomodo de recursos para sobrevivir y el efecto de ahorro en consecuencia se desdibuja. En el caso de $x_{2.1}$, sobrevive el bien con los ajustes necesarios e idénticos a los de x_2 pero utiliza ahora no la mejor regla descubierta sino que se desplaza a una segunda mejor (*second best*). La tecnología a_2 no sobrevive y se elimina completamente del sistema y en contraste el bien x_1 obtiene un ahorro de un recurso que no requería obteniendo una mayor aptitud.

4.6.4. Efectos sobre las poblaciones.

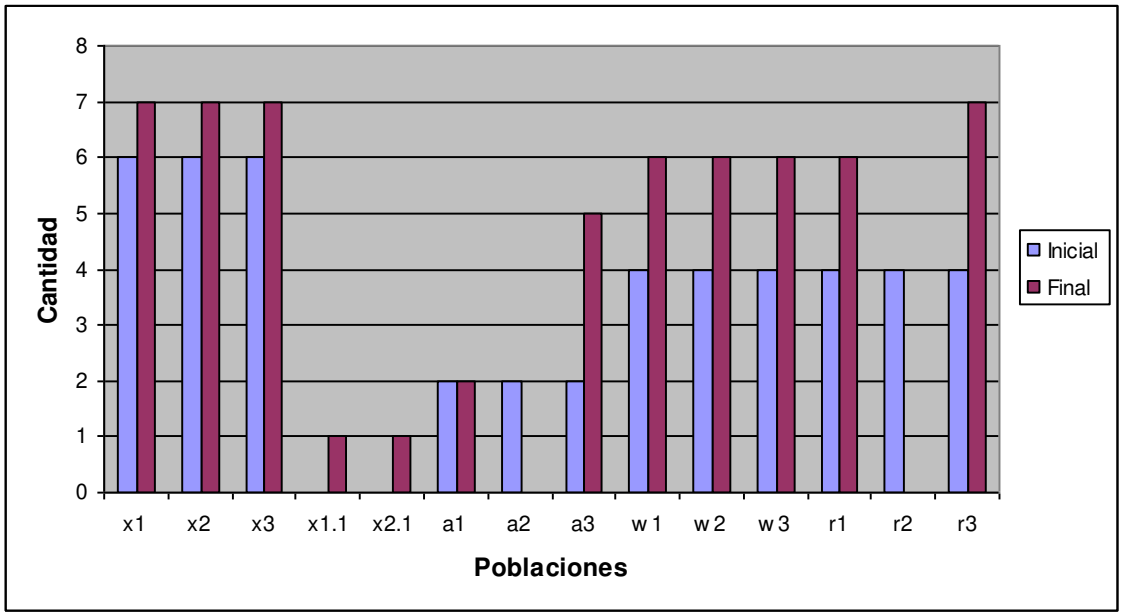
Todos los casos presentados afectan el tamaño de las poblaciones así, el primer fenómeno que se observa es la emergencia de dos bienes que antes no existían en el sistema, $x_{1.1}$ y $x_{2.2}$. Dichos bienes son resultado de innovaciones tanto por el lado de la oferta como por el lado de la demanda. Dos poblaciones se extinguieron a_2 y r_2, el primero por factores endógenos y el segundo por factores exógenos. El resto de las poblaciones sobrevivieron y crecen a distintas tasas según la tabla que relaciona a los distintos bienes que se presenta a continuación:

Tabla 19. Relaciones de los bienes, insumos o servicios incluyendo las variaciones $x_{1.1}$ y $x_{2.1}$.

El agente:	Que oferta:	Requiere del bien, insumo o servicio:									
e_1	x_1			x_3	a_1	a_3	w_1	w_2	w_3	r_1	r_3
e_2	x_2	x_1	x_2	x_3		a_3	w_1	w_2	w_3	r_1	r_3
e_3	x_3	x_1	x_2			a_3	w_1	w_2	w_3	r_1	r_3
e_1	$x_{1.1}$			x_3		a_3	w_1	w_2	w_3	r_1	r_3
e_2	$x_{2.1}$	x_1	x_2	x_3		a_3	w_1	w_2	w_3	r_1	r_3
te_1	a_1		x_2				w_1	w_2		r_1	r_3
te_3	a_3	x_1			a_1				w_3		r_3
h_1	w_1	x_1	x_2	x_3							
h_2	w_2	x_1	x_2	x_3							
h_3	w_3	x_1	x_2	x_3							

De esta tabla se pueden extraer los cambios que sufrió el sistema en términos de las poblaciones, gráficamente:

Fig. 42. Cambios en las poblaciones de bienes, insumos y servicios



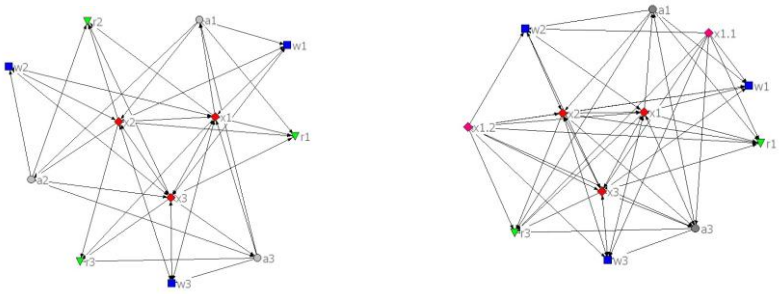
Y como se puede observar, emergieron poblaciones, se extinguieron otras y las sobrevivientes crecieron en distintas tasas. Esto en términos de ciencia económica es particularmente importante, puesto que el presupuesto y conclusión de la teoría neoclásica de equilibrio general se trastoca y lo único que puede relativamente sustituir el concepto es uno de análisis de tendencias de equilibrio cuasíestacionario, pero nunca un equilibrio único y estable.

4.7. COMPLEJIDAD, INTEGRACIÓN TEÓRICA Y MODULARIDAD.

Las pequeñas variaciones que se realizaron en presente ejercicio permiten concluir fácilmente que el sistema se altera en su conjunto. Además, permite evidenciar el hecho de que cualquier sistema complejo adaptable presenta un carácter dual desde la perspectiva de los agentes, a saber, cada agente es un sujeto del sistema y al mismo tiempo es una parte del ambiente, de tal modo que el sistema en su conjunto cambia permanentemente. Asimismo, el principio de perfecta descomposición se va reduciendo conforme se transforma el sistema de tal modo que el supuesto de K=1 se elimina generando cada vez una mayor relación epistética en el conjunto del sistema. Esto se

puede observar en la siguiente gráfica que compara las relaciones entre bienes antes y después del proceso de adaptación:

Fig. 43. Representación del cambio total en el sistema



A simple vista se puede observar como el sistema se vuelve más complejo incluso sólo a nivel de bienes, en el caso de las funciones y componentes esto se vuelve aún más evidente. La densidad simple de la primera red es de 0.44 mientras que la densidad de la segunda es de 0.59. Si se continuara el ejercicio y las condiciones de adaptación fueran favorables, la densidad de la red se acercaría a 1. Esto pareciera positivo sin embargo, no lo es tanto, puesto que conforme se integra el sistema un pequeño cambio (como en el caso de la eliminación de r_2 que se vinculaba prácticamente con la mitad de los bienes) puede alterar una buena parte del sistema y en condiciones propicias incluso colapsarlo, por otra parte, la integración dificulta la adaptación puesto que para hacer un cambio grande o pequeño, implicaría una serie de cambios que podrían resultar costosos, confusos e inciertos.

Es por esta razón que la modularidad se presenta como una estrategia de control de la complejidad, puesto que la separación de las partes del sistema permite un mayor dominio del mismo y aumenta la posibilidad de adaptación. Desde luego, al no ver el conjunto del sistema, las posibles adaptaciones pueden ser subóptimas (como el caso del bien x_3 que utilizaba el recurso r_2 aunque no fuera necesario) pero se adquiere velocidad y una mayor posibilidad de variación.

Es importante distinguir que el proceso de integración del sistema no tiene la secuencia:

Simple→ Modular→ Integral.

Sino por el contrario, se presenta como una secuencia:

Simple→ Integral→ Modular

Y aunque como se puede observar en los casos presentados, que parten de un principio recurrente de separación por bloques de construcción, esto no implica modularización del sistema, sino simplemente un mecanismo de resolución de problemas complejos. Por lo tanto, no debe de confundirse el objeto (sistema) con un método de control del problema.

Aclarado esto, conviene hacer algunas reflexiones:

1. El sistema que en inicio resulta simple, dadas sus relaciones no lineales, sus distintos flujos, su capacidad de recombinarse (agregarse o dividirse) en bloques de construcción y la posibilidad de prefigurar el futuro (modelos internos), se modifica constantemente y se vuelve más complejo. De tal modo, que el grado de interrelación entre los agentes aumenta y el supuesto inicial de K=1 se elimina por un K= N-1.

2. Según lo propuesto en el capítulo anterior, esto afecta a prácticamente todas las formas de relación contenidas en el sistema y en consecuencia, crea condiciones para que los procesos de innovación se ajusten a estas condiciones según K=1→ K=N-1.

3. Siguiendo esta línea de argumentación ahora es posible ver con una ilustración más fina los distintos conceptos que se introdujeron en el capítulo anterior, a saber:

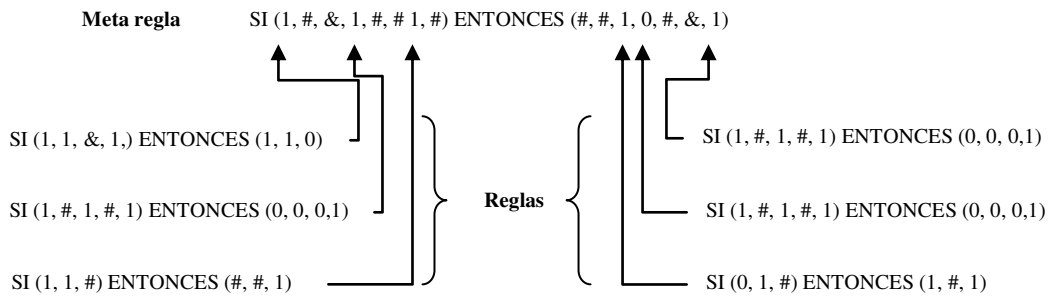
a) Descomposición. Lo que se llamó perfecta descomposición se refiere al hecho de poder separar un agente (bien, servicio, recurso, empresa, etc.) en sus partes, esto resulta sencillo en la vecindad, pero por el contrario, cuando se pretende separar a un agente hacia niveles más distantes, resulta más difícil por las interacciones que los elementos jerárquicamente menores presentan con el resto, y en consecuencia, el sistema que se nombra sin descomposición, -para este punto es evidente que cualquier sistema se puede descomponer, y que la imposibilidad hacerlo es solo un modelo tipo ideal para indicar dicha dificultad- se genera en paralelo al aumento de la complejidad del sistema. La descomposición es posible observarla en el diseño de los bloques de

construcción a partir de las cadenas binarias que describen todos los elementos del sistema, separar por ejemplo (0, 1, 0, 0) en (0, 1, #, #).

b) Solución de problemas. La solución de problemas se realiza con una estructura basada en un método de ensayo y error que se combina un conjunto de hipótesis de la forma SI-ENTONCES y un sistema de evaluación (asignación de crédito para cada uno de los ensayos) del cual emergen reglas. Las reglas exitosas son soluciones, si el problema es relativamente simple entonces, la solución se realiza directamente por este mecanismo para el problema concreto, pero si el problema es complejo, con la misma estructura –ensayo y error de las hipótesis SI-ENTONCES evaluadas por un sistema de crédito- se descubren reglas que forman reglas, meta-reglas. Por ejemplo, cuando el productor "descubre" que el usuario altera una función del producto ofrecido y reacciona alterando el diseño de "ese" producto particular aumentando con ello su nivel de aptitud o incluso generando una nueva familia de productos, entonces, "descubre" también, que si altera también el diseño de "cualquier" otro producto que ofrece entonces, aumenta su nivel de aptitud. Pero no solo esto, además, "descubre" los métodos (reglas) para alterar su diseño creando con ello una meta-regla. Así, conforme aumenta la complejidad de problema, las soluciones particulares se basan en reglas más generales hasta llegar a heurísticas.

c) Reglas. Las reglas, por lo tanto son rígidas en problemas simples, y se manifiestan en rutinas, y conforme aumenta la complejidad se vuelven más generales (flexibles en cuanto solucionan múltiples problemas o problemas simultáneos) y con niveles de abstracción mayores. Cadenas más largas con bloques de construcción basados en bloques de construcción jerárquicamente menores.

Fig. 44. Jerarquía de reglas



d) Aprendizaje. Es evidente que con este método de análisis se puede modelar al aprendizaje, la experiencia se vuelve regla de comportamiento que se utilizará mientras funcione y se mantengan las condiciones relativamente estables, pero al presentarse el cambio, los agentes son capaces de adaptarse y en consecuencia aprender nuevas reglas que les permitan sobrevivir, quienes no lo logran se extinguen como el caso presentado del bien tecnológico a_1. De tal modo que el aprendizaje es resultado de la experiencia originando nuevos conocimientos que los agentes utilizan para sobrevivir. Si se presentan problemas simples las soluciones que los resuelven, son reglas también simples, si el problema se vuelve más complejo, las reglas utilizadas no son aptas y por lo tanto se extinguen, y si las condiciones son favorables, se generan nuevas reglas cada vez más sofisticadas dando paso a nuevos conocimientos.

e) Capacidades. La combinación de conocimientos específicos y las reglas de supervivencia que utilizan los agentes constituyen sus capacidades, estas desde luego se incrementan conforme el proceso de aprendizaje se adapta (es apto) ante los cambios. Si el agente es capaz de sobrevivir ante las variaciones del sistema, sólo es, porque en el proceso generó las capacidades que no sólo le permiten adaptarse para ese momento, sino que además, lo capacitan para adaptarse ante cambios futuros. De nuevo ante problemas simples, las capacidades para resolverlos son pocas, en el caso de un productor, resuelve su problema de producción recolectando insumos, y tras su recomposición, ofrece un nuevo bien (capacidades productivas), pero si se presentan cambios en el ambiente (i.e. el agotamiento de un recurso, como en uno de nuestros ejemplos sucedió con el recurso r_2), aquellos que pueden identificar y resolver el nuevo problema se mantendrán en el sistema, y de nuevo, si lo hacen es porque incrementaron sus capacidades, donde el nivel más alto identificado por la literatura es el de las capacidades dinámicas.

f) Proveeduría. Por otro lado, los agentes oferentes de bienes (proveedores) como se argumentó conocen sus componentes y sus funciones y ante problemas simples son capaces de encontrar soluciones, sin embargo, conforme se vuelve más complejo el sistema pueden ser incapaces de resolverlo, por lo tanto, una regla que puede aplicar es la de acudir ante a otro agente (proveedor) para que en forma de bien -componente- le resuelva su problema, de tal manera que el conocimiento preciso que antes tenía este

agente de sus componentes lo transfiere a otro y sólo los valora en su forma de función, y si este fenómeno se reproduce conforme aumenta la complejidad, se puede llegar al caso de producir bienes con base en una proveeduría de caja negra. El productor en consecuencia sólo mantiene el conocimiento de una parte de sus bienes, presentando problemas de agente-principal. El nivel máximo de este fenómeno son componentes de caja negra.

g) Contratos. Ante este último fenómeno, los problemas de coordinación sujetos al riesgo moral o selección adversa de la relación proveedor-usuario, crean la necesidad utilizar instrumentos institucionales que hagan coincidir los intereses. Así, las estructuras contractuales varían dependiendo la complejidad del problema pasando para problemas simples por contratos clásicos hasta contratos relacionales para problemas complejos. Naturalmente, la red de proveeduría no solo se extiende en tamaño, sino además, en grado de intensidad de sus relaciones.

h) Sectores. Por último, como puede deducirse, los agentes se diversifican creando meta-agentes (sectores) que sean capaces de innovar lenta o aceleradamente y este criterio es el utilizado por Pavitt para organizar su taxonomía.

4. La supervivencia del sistema tiene como elemento central su capacidad para adaptarse a sus propios cambios y cuando la complejidad es alta, es fundamental crear mecanismos para controlarla y como se argumentó, la modularidad es un mecanismo para hacerlo. Lo relevante es que ante sistemas de alta complejidad, la innovación como se ha demostrado se presenta en redes: un cambio afecta a su vecindad, y esta a su vez, en mayor o menor medida al conjunto del sistema. Como es prácticamente imposible controlar todo el sistema (tanto por la racionalidad limitada como por la incertidumbre) solo es posible controlar partes y la coordinación de esas partes con un objetivo común requiere de artificios como lo son los contratos que no especificaran las formas de solucionar los problemas (cada agente en lo individual y dependiendo de sus capacidades lo hará a su modo) pero si especificarán los objetivos técnicos que requieren los usuarios y por lo tanto, la atención de los productores se centrará más que en el conocimiento específico del componente, en las funciones que desempeñen y en las interfaces que integren a su producto.

5. Si bien, como se argumentó en el capítulo anterior, esta ignorancia del conjunto del sistema puede llevar a soluciones subóptimas por el uso de la modularidad

como mecanismo de control de la complejidad, éste método presenta la ventaja de resolver los problemas más rápido que con la solución integral de la fuerza bruta, y como se puede observar del modelo presentado, esto parece ser más importante para efectos de supervivencia de los agentes.

6. Considerada a la innovación en redes (o lo que originariamente se exponía como en racimos), permite integrar dos temas recurrentes en la literatura especializada: las trayectorias de dependencia y los tecnoparadigmas. En el primer tema, es evidente que como las innovaciones se presentan en sus vecindades, los cambios que se hagan, por lo general, se hacen en esos mismos espacios, por lo tanto, lo que se haga hoy depende de los que se haya hecho antes (la historia importa) y los cambios futuros dependen de los presentes. Si se extiende esta idea para todo el sistema y para múltiples generaciones pueden entonces identificarse tecnoparadigmas.

7. Finalmente, el uso de los SCA puede no sólo integrar formalmente a una buena parte de la literatura especializada en el tema de la innovación tecnológica, sino además, puede sentar las bases para explicar con otros ojos a la totalidad del fenómeno económico.

Por lo tanto, se puede concluir que los modelos de complejidad son apropiados para representar la innovación tecnológica y permite formalizar sus ideas fundamentales. El presente modelo es sólo un primer acercamiento que permite explicar la emergencia de la innovación e incorpora solo los elementos micro, sin embargo, es plausible suponer que se puede extender a los niveles meso y macro que permitan integrar al cuerpo de la innovación tecnológica.

CONCLUSIONES.

Las conclusiones que se desprenden de este trabajo son de dos tipos, el primero, tiene que ver con las reflexiones concretas que sobre algunos temas de la innovación tecnológica no había sido capaz observar y que considero son significativas para el avance del programa de investigación y; el segundo, tiene que ver con la puntualización del significado que tiene el uso de los SCA para el avance tanto en la consolidación de una teoría de la innovación tecnológica, como de la construcción de la Economía Evolutiva.

1. La posibilidad de poder agrupar con cierta facilidad a ciertos temas de la innovación tecnológica en conjuntos sintéticos, demuestra que estos temas son en realidad particularidades que pueden resumirse en una sola categoría. En concreto, me refiero a los temas referentes al aprendizaje y a las capacidades. Estas definiciones múltiples si bien tienen un efecto positivo en la innovación y los casos de estudio que las definen (o auto-refuerzan) son verosímiles, resultan poco útiles en términos de la construcción de categorías analíticas robustas que nutran a una teoría general. Sin restar importancia al conocimiento que ha aportado estas definiciones y reconociendo que éstas son producto del análisis concreto e inductivo, la parte del modelo expuesto en el presente trabajo que se refiere al método de ensayo y error que enfrenta a la generación y recombinación de hipótesis evaluadas por un sistema de crédito que determina el grado de aptitud de las mismas y que genera con ello reglas, abstrae a prácticamente toda esta literatura. Cada regla descubierta por este procedimiento es un aprendizaje concreto (*learning-by*) y cada meta-regla una capacidad (*capability*). El uso de estas categorías (reglas y meta-reglas) tiene una fuerza mayor en el sentido de que presenta una economía explicativa y permite vincularlo con un conjunto mayor de relaciones que sin perder las particularidades explican más ampliamente el fenómeno económico de la innovación tecnológica.

2. Originariamente, la metáfora genética de los sistemas se concretaba en el análisis de las rutinas, y el estudio de Nelson y Winter (1984) permitió extender esta idea de tal forma que la rutina se presentaba como el gen, que modificado, representaba a la innovación tecnológica. Por ello, durante casi una década, el estudio de las rutinas

se volvió central en el estudio de la innovación tecnológica. Sin embargo, con los presentes avances de modelación, esta metáfora ya no sólo puede vincularse con la rutina, sino además, (y como se hizo en este trabajo) permite describir tanto a cualquier agente, como a cualquier estado de la naturaleza y a cualquier regla de conducta. Esto permite, explicar desde cualquier espacio del sistema, el origen de una variación y observar cómo afecta al conjunto tanto en grado como en dirección. Así, la naturaleza de la innovación tecnológica se presenta ubicua en la totalidad del sistema. De tal modo que, la ventana de explicación de la emergencia de la innovación tecnológica se amplia.

3. La complejidad, ha pasado de ser un adjetivo sinónimo de dificultad a un objeto y herramienta de estudio. La posibilidad de medirla en grados permite no sólo, como se ha hecho aquí, construir un mapa y ubicar cada fenómeno o explicaciones asociadas al mismo, sino que permite además, observar relaciones que antes no eran posibles, como la secuencia pequeño cambio→ adaptación en la vecindad→trayectoria de dependencia→tecnoparadigma. Ello permite, articular (aunque sea parcialmente) al cuerpo teórico de la innovación creando una consistencia interna y con base en construcción desde sus partes más pequeñas (modelos *bottom up*). Esta posibilidad en el debate epistemológico de la economía no es un hecho menor, el problema de la agregación neoclásica no ha sido resuelto; en toda la corriente de los microfundamentos de la macroeconomía aún hay huecos y debates profundos y; la macroeconomía no ha podido desagregar ni siquiera en dos sectores a sus unidades de análisis. Además, el análisis de la complejidad, nos permite observar fenómenos generales como el de los mundos pequeños, lo cual nos permite concluir que –y aunque todos los elementos están interconectados por un vínculo directo o indirectamente por una sucesión de nodos (agentes)- la complejidad generada por el propio proceso de adaptación, crea simultáneamente, diversidad y aglutinamiento (sectores), lo que de nuevo, resuelve un problema que la corriente dominante no ha podido explicar.

4. Asociado al punto anterior, la complejidad nos permite formularnos preguntas que antes no eran posible, en particular, a lo largo del desarrollo de este trabajo, emergieron dos preguntas relacionadas. 1 ¿Cuál es el nivel de complejidad económica más apropiado para la supervivencia humana? Intuitivamente, creo que es un nivel medio el más adecuado, puesto que aunque se pierde diversidad, los sistemas pequeños son débiles ante los cambios, y los grandes sistemas integrados se vuelven

lentos y frente un conjunto de cambios simultáneos (internos y externos) su incapacidad de rápida adaptación puede provocar su colapso. Y 2. ¿El control del nivel de complejidad económica por parte de los diseñadores de políticas públicas, debe ser un criterio normativo para la elaboración de las mismas? Las preguntas que emergen de esta perspectiva no son pocas y lo significativo es la posibilidad de poder hacerlas.

5. Durante la formulación del modelo, un tema que resultó particularmente difícil de trabajar fue el de la relación función-componente que si bien, ha sido discutido en la literatura, hay por lo menos tres características que me parece relevante apuntar. La primera se refiere a la no-linealidad de esta relación, es decir, un componente puede tener más de una función o una función requiere de la participación de varios componentes, este hecho, es justamente el elemento clave que no sólo enlaza a los participantes del proceso económico, sino que lo hace de forma compleja. La segunda, segunda es el problema de información asimétrica que contiene esta relación, si el usuario del componente es el mismo agente que lo produce, tiene toda la información del mismo, sin embargo, si no es así, se genera un problema de riesgo moral o de selección adversa. Por último, esta relación, vincula lo objetivo (el componente) con lo subjetivo (la función), es decir, el artefacto tiene un carácter teleológico desde la perspectiva del proveedor, pero no necesariamente se cumple, pues el poder del destino final del uso del mismo está en el usuario, esta valuación desde luego es especialmente relevante en la discusión del "valor" en la economía, desde la teoría del valor trabajo, hasta el marginalismo.

6. La relación entre los componentes que generan una función requieren de una interconexión adecuada para el funcionamiento final, esta vinculación (interface) cobra particular importancia pues es a partir de ella que puede controlarse la complejidad, dado que si se acuerda entre los proveedores dichas interfaces, el resto del diseño del componente es un problema independiente que soluciona el conjunto del sistema. Esta idea ha sido trabajada por Baldwin y Clark (2000) introduciendo el concepto de la matriz de tareas de diseño. Lo relevante de esto es la identificación de interfaces clave en el conjunto del sistema, es decir, extender el análisis del componente a la totalidad del sistema, esto, permitirá fijar un nuevo criterio en cuanto políticas de innovación tecnológica. Por ejemplo, permitirá identificar los elementos específicos de la triada empresa, universidad y gobierno más allá de una noción de cooperación voluntaria.

7. La modularidad es una estrategia de control de la complejidad que como regla ha demostrado una alta aptitud, sin embargo y aunque teóricamente, cualquier sistema es descomponible, las interacciones de ciertos componentes centrales han dificultado la posibilidad de hacerlo, esto tiene dos fuertes implicaciones, una práctica y una teórica. La práctica es que los pasos que utilizan las empresas para modularizarse tanto hacia adentro como hacia fuera pueden ser equivocados o lentos, de tal modo, que el proceso previo a la modularización puede crear el peor de los escenarios: suboptimalidad y lentitud. Por ello, al optar por una estructura modular debe considerarse a la velocidad de transición como algo prioritario. La implicación teórica es justamente determinar las condiciones que eviten la descomposición del sistema, abstraer las estrategias de solución alternativa y determinar los factores que aceleren o detengan el proceso de transición.

8. El estudio de la complejidad en la Economía Evolutiva, le aporta a ésta una ventaja explicativa superior en muchos sentidos a la teoría neoclásica. Pero más allá del carácter epistemológico los resultados a los que llega son mucho más verosímiles, a saber, análisis desde el marco de estudio de la complejidad, permite determinar la dinámica del cambio económico, no sólo en términos cuantitativos (crecimiento económico) sino además, en términos cualitativos, las formas concretas en las que se manifiesta el cambio. De esto se desprende en consecuencia la ausencia de un equilibrio donde las fuerzas contrarias de oferta y demanda estabilizan al sistema, y en su lugar se atiende a las condiciones para estabilizar al sistema dinámico no-lineal y se identifican espacios tanto de competencia como de cooperación. Además, temas que han rozado a la economía neoclásica y que aún se mantienen en debate como las externalidades o las fallas de mercado, se presentan en esta perspectiva como elementos propios de la teoría que no debilitan en nada sus posibilidades de explicación. Esto permite incorporar endógenamente, mecanismos de coordinación entre los agentes distintos a los del mercado, ampliando con ello las posibilidades y objetivo en el diseño de políticas públicas. En resumen, esta corriente puede competir frente a la teoría neoclásica tanto en su carácter de explicación como en las implicaciones de política que de ésta se desprendan.

9. Si bien las expectativas sobre esta corriente de estudio son altas, mucho camino está por delante. Temas como el efecto del dinero en el sistema económico

(monetarismo); el significado de los precios en el sistema (criterios de valoración); el papel que desempeñan los derechos de propiedad (filosofía económica, economía normativa y economía institucional); por citar sólo algunos de los grandes temas, no han sido estudiados por este programa y sus aportaciones se encuentra en una fase inicial. La masa crítica aún no es lo suficientemente grande para consolidar una teoría y la incorporación de más investigadores de estos temas es necesaria para acelerar el proceso. El espacio de exploración es amplio y estimulante.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmadi R., T. A. Roemer y R.H. Wang. (2001). "Structuring Product Develompment Processes". *European Journal of Operational Research*(130), 539-558.

Arrow, K. J. (1962). The economic implications of Learninig by Doing. *Review of Economic Studies, 29*(80), 155-173.

Bain, J. (1962). *Organización Industrial.* Barcelona: Omega.

Baker K.R, M.J. Magazine y H. L. W. Nuttle. (1986). The Effect of Commonality on Safety Stock in a Simple Inventory Model. *Managment Science, 32*(8), 983-988.

Baldwin, C. J. y K. Clark. (2000). *Design Rules.* Massachusetts: MIT Press.

Barabási, A. L. (2002). *Linked: The New Science of Networks.* Cambridge, MA: Perseus Press.

Bell, M. (1984). "'Learning' and the Accumulation of Industrial Technological Capacity in Developing Countries". (K. K. (eds), Ed.) *Technological Capacity in the Third World*, pp. 187-209.

Bell, M. y. (1995). "The Development of Technological Capabilities". En H. (ed.), *Trade, Technology and International Competitiveness* (págs. pp. 69-101). Washington: The World Bank.

Bruseni S. y A. Prencipe. (1999). Modularity in Complex Product System: Managing the Knowladge Dimension. *Working Paper CoPS Sussex*. Sussex: SPRU Sussex University.

Cimoli, M. (2000). *Developing Innovation Systems: Mexico in the Global Context.* London: Continuum.

Cohen, W. y. (Septiembre de 1989). "Innovation and Learning: the Two Faces of R&D". *The Economic Journal*(99), pp. 569-596.

Cohen, W. y. (1990). "Absorptive Capacity: a New Perspective on Learning and Innovation". *Administrative Sciences Quaterly, 35*(1), pp. 128-152.

Collier, D. A. (1982). Aggregate Safety Stocks Levels and Component Part Commonality. *Managment Science, 28*(11), 1297-1303.

David, P. (Mayo de 1985). "Clio and the economics of Qwerty". *American Economic Review, 75*(2), 332-337.

David, P. A. (June de 2000). Path dependence, its critics and the quest for 'historical economics'. All Souls College, Oxford & Stanford University.

Desai P., S. Kekre, S. Radhakrishnan y K. Srinivasan. (2001). Product Differentiation and Commonality in Design: Balancing Revenues and Cost Drivers. *Managment Science, 47*(1), 37-51.

Dodgson, M. (1993). "Organizational Learning: A Review of Some Literatures". *Organizational Studies, 14*(3), pp. 375-394.

Dosi, G., Hobday, M., Marengo, L.y Prencipe A. (2002). *The Economic of System Integration: Toward an Evolutionary Interpretation.* DRAFT, Studies, Laboratory of Economics and Management Sant'Anna School of Advanced, Pisa.

Dosi, G.; C. Freeman; R. Nelson; G. Silverberg y; L. Soete . (1988). *Technical Change and Economic Theory.* London y NY: Pinter Publishers.

Egidi M., L. Marengo y A. Narduzzo. (1994). On the origin and nature of organizational routines: some evidence from experiments. *The Eunetic Conference Evolutionary Economics of Technological Change: Assessment of results and new frontiers*. Strasbourg.

Egidi, M.y L. Marengo. (2004). "Near-Decomposability, Organization, and Evolution: Some Notes on Herbert Simon's Contribution". En M. (. Augier, *Models of a man: Essays in memory of Herbert A. Simon* (págs. pp. 335-350). Cambridge, MA: MIT Press.

Eppinger, S. D., D. E. Whitney, R. P. Smith y D. A. Gebala. (Noviembre de 1993). A Model-Based Method for Organizing Tasks in Product Development. *WP# 3569-93-MS.* Massachusett, EUA: MIT.

Erdős, P. y. (1959). On random graphs. *Publicaciones Mathematicae*(6), 290-297.

Ernst R. y B. Kamrad. (2000). Evaluation of supply structures through modularization and postponement". *European Journal of Operational Research*(124), 495-510.

Etzkowitz, H. y. (1997). *Universities and the Global Knowledge Economy : A Triple Helix of University-Industry-Government Relations.* London: Continuum.

Feitzinger E. y H. L. Lee. (Enero - Febrero de 1997). Mass Customization at Hewlett-Packard: The Power of Posponement". *Harvard Business Review*, 116-121.

Fixon, S .y M. Sako. (2001). Modularity in product architecture: will the auto industry follow the computer industry? (An analisys of Product Architecture, Market Conditions, and Institutional Forces). *Fall Meeting 2001 International Motor Vehicle Program (IMVP)*, (pág. 66). Cambridge MA.

Freeman, C. (1979). *Economía de la innovación industrial.* Madrid: Alianza Editoria.

Frenken K., L. Marengo y M. Valente. (1998). *Interdependencies, nearly-decomposobality and adaptacion.* Workshop "Agent-based and Population-based Modelling", Max-Planck-Institute, Jena.

Frenken, K. (Febrero de 2000). A complexity approach to innovation networks. The case of the aircraft industry (1909-1997). *Research Pollicy*(2), 257-272.

Frenken, K. (2006). *Innovation, Evolution and Complexity Theory.* Northampton MA: Edward Elgar Publishing.

Hageman, M. K. (1999). "Marshallian Externalities and Inovation". *Journal of Economic Growth, 4*(1), 39-54.

Henderson R. M. y K. B. Clark. (1990). Architectural Innovation: The Reconfiguration of Exixting Product Thecnologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly*(35), 9-30.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.* Cambridge, Mass.: MIT Press.

Holland, J. H. (1996). *El orden Oculto, de como la adaptación crea la complejidad.* México: FCE.

Kauffman, S. A. (1993). *The origins of order: self-organization and selection in evolution.* New York: Oxford University Press.

Lall, S. (1993). "Technological Capabilities". En J. S. (ed.), *The Uncertain Question: Science, Technology and Development* (págs. pp. 264-301). Tokyo: United Nations University Press.

Langlois, R. N. (Agosto de 1999). Modularity in Technology, Organization, and Society. *Working Paper 1999-05.* Storrs, CT, EUA: University of Connecticut.

Lundvall, B. (1992). *National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning.* London: Pinter Publishers.

Malerba, F. (1992). "Learning by Firms and Incremental Technical Change". *The Economic Journal*(102), 845-859.

Mandelbrot, B. (1997). *La geometría fractal de la naturaleza.* Barcelona: Tusquets Editores.

March, J. G. (1991). Exploration and Explotation in Organizational Learning. *Organizational Science, 2*(1), 71-87.

Marx, K. (1975). *El Capital. Libro Primero. El Proceso de Acumulación de Capital.* (1a. ed., Vol. 1). México: Siglo XXI.

Milgram, S. (1967). The Small world problem. *Psychology Today*(2), 60-67.

Milgrom, P. y J. Roberts. (1992). *Economics, Organization and Management.* Prentice Hall.

Nelson, R. y. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change.* Cambridge, MA: Harvard University Press.

Nickerson J. A. y T. R. Zenger. (Noviembre-Diciembre de 2004). A Knowledge-Based Theory of the Firm: The Problem-Solving Perspective. *Organization Science, 15*(6), 617-632.

Nonaka, I. y. (1995). *The Knowledge-creating Company.* New York: Oxford University Press.

Pavitt, K. (Diciembre de 1984). "Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory". *Research Policy, 13*(6), 343-373.

Penrose, E. (1959). *The Theory of the Growth of the Firm.* Oxford: Basil Blackwell.

Pérez, C. (2002). *Technological revolution and financial capita.* Londres: Edward Elgar.

Potts, J. (2000). *The new evolutionary microeconomics* . Northampton MA: Edwar Elgard Publising.

Sanchez R. y J. T. Mahoney. (2003). Modularity, Flexibility, and knowledge management in product and organization design. En K. A. Garud R., *Managing in the Modular Age. Architectures, Networks and Organizations.* (págs. 362-389). Oxford: Blackwell Publishers .

Schumpeter, J. A. (1968). *Capitalismo, socialismo y democracia.* Madrid: Aguilar.

Simon, H. A. (1973). *Las ciencias de lo artificial.* Barcelona: Gráficas Víctor.

Simon, H. A. (1991). Bounded Rationality and Organizational Learning. *Organization Science, 2*(1), pp. 125-134.

Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering Reading.* MA: Addison-Wesley.

Teece, D. (Noviembre de 1996). "Firm organization, industrial structure and technological innovation". *Journal of economic behavior and organization, 31*(2), 193-224.

Teece, D. R. (1994). Understanding Corporate Coherence: Theory and Evidence. *Journal of Economic Behaviour and Organitation, 1*(23), 1-30.

Teece, D. y Pisano G. (1994). The Dynamic Capabilities of Firms: An Introduction. *Industrial and Corporate Chance, 3*(3), 537-56.

Tirole, J. (1988). *The theory of Industrial Organization.* Massachusetts: MIT Press.

Ulrich K. T. y Eppinger, S. D. (2000). *Product Design and Development.* McGraw-Hill.

Vernon, R. (1979). "La inversión internacional y el comercio internacional en el ciclo de productos". En N. Rosemberg, *Economía del cambio tecnológico* (págs. 234-267). México: FCE.

Watts, D. J. (1999). *Small Worlds: The Dynamics of Network between Order and Randomness.* Pincenton, NJ: Princenton University Press.

Williamson, O. E. (Octubre de 1979). Transaction-Cost Economics: The Governance of Contractual Relations. *Journal of Law and Economics, 22*(2), 233-261.

Williamson, O. E. (1991). *Mercados y jerarquías: su análisis y sus implicaciones antitrust.* México: FCE.

Zoltan, J. A. (Noviembre de 1987). Innovation, Market Structure, and Firm Size. *The Review of Economics and Statistics, 69*(4), pp. 567-574.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema básico de la innovación. 11
Fig. 2. Interacción entre la innovación tecnológica y las condiciones económicas e institucionales 15
Fig. 3. Representación de la agregación de un Sistema Complejo Adaptable. 32
Fig. 4. Estructura genética 39
Fig. 5. Ejemplo de la regla SI-ENTONCES 41
Fig. 6. Algoritmo Genético 43
Fig. 7. Cubo Boleano representativo de un paisaje de aptitud 49
Fig. 8. Representación ad hoc de un paisaje de aptitud. 50
Fig. 9. Representación de una distribución de probabilidad de tipo "Ley de potencia" . 57
Fig. 10. Matriz de diseño 62
Fig. 11. Matriz de tareas de diseño 63
Fig. 12. Representación simple de un proceso de producción 64
Fig. 13. Representación de un proceso de producción modular 64
Fig. 14. Ejemplo de la aplicación del operador modular "Dividir" 66
Fig. 15. Selección de mecanismo por tipo de problema 72
Fig. 16. Costos esperados para cada tipo de organización a partir del nivel de complejidad del problema. 74
Fig. 17. Nivel de complejidad frente a la especialización, a la selección de métodos de solución de problemas y la organización 76
Fig. 18. Nivel de complejidad frente a la estructura de contratos 78
Fig. 19. Nivel de complejidad frente a las reglas 79
Fig. 20. Nivel de complejidad frente a los tipos de aprendizajes. 81
Fig. 21. Nivel de complejidad frente a la explotación y la exploración 82
Fig. 22. Esquema de relación entre aprendizajes y capacidades 85
Fig. 23. Nivel de complejidad frente al tipo de capacidades 86
Fig. 24. Nivel de complejidad frente al tipo de proveeduría 87
Fig. 25. Nivel de complejidad frente a la Taxonomía de Pavitt 89
Fig. 26. Cadena productiva de refrescos 90
Fig. 27. Cadena productiva de Automóviles 90
Fig. 28. Agentes y flujos del modelo 99
Fig. 29. Imagen arbitraria del crecimiento de las poblaciones 118
Fig. 30. Relaciones simples del bien x_1 120
Fig. 31. Relaciones relativamente complejas del bien x_1 120
Fig. 32. Máxima complejidad de las relaciones del bien x_1 121
Fig. 33. Relaciones simples del bien x_1 122
Fig. 34. Matriz binaria de componentes del bien x_1 122
Fig. 35. Relaciones de primer y segundo nivel para la composición del bien x_1 123
Fig. 36. Secuencia de componentes y funciones del bien x_1 para satisfacer S_i 124
Fig. 37. Relaciones de componentes y funciones del bien x_1 125
Fig. 38. Relación de componentes y funciones del bien x_2 134
Fig. 39. Representación del cambio de componentes del bien x_2 136
Fig. 40. Representación del cambio componente y función del bien x_2 139
Fig. 41. Relaciones del recurso r2 con los bienes, insumos o servicio. 141

Fig. 42. Cambios en las poblaciones de bienes, insumos y servicios 145
Fig. 43. Representación del cambio total en el sistema 146
Fig. 44. Jerarquía de reglas..... 148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de aptitud 49
Tabla 2. Taxonomía de Pavitt..... 88
Tabla 3. Esquema de la relación entre el nivel de complejidad y los distintos ámbitos de la teoría de la innovación a partir de las notaciones de Holland y Kuaffman. 92
Tabla 4. Valores de las hipótesis lanzadas por h_1 para obtener x_1..... 103
Tabla 5. Valor del cruzamiento de las hipótesis lanzadas por h_1 para obtener x_1 104
Tabla 6. Valor de cruzamiento de las mejores reglas lanzadas por h_1 para obtener x_1. 105
Tabla 7. Valores de las hipótesis del bloque a) 107
Tabla 8. Valores de las hipótesis del bloque b) 109
Tabla 9. Valores de las hipótesis del bloque c) y d) 110
Tabla 10. Valores del cruzamiento de las mejores hipótesis obtenidas de los bloques c) y d) 110
Tabla 11. Valores del cruzamiento de la mejor hipótesis obtenida con otras 111
Tabla 12. Valores las hipótesis lanzadas por la empresa e_1 114
Tabla 13. Matriz de requerimientos de los bienes, insumos o servicios 119
Tabla 14. Valores de las hipótesis que identifican a las funciones del bien x_1 con la quinta necesidad de h_1 128
Tabla 15. Valores del cruzamiento de la mejor hipótesis de identificación de las funciones de x_1 para satisfacer la quinta necesidad de h_1 129
Tabla 16. Valores de las hipótesis por generar el bien x_1 modificado 132
Tabla 17. Valores de las hipótesis de cambios en las funciones de F2 incluyendo cruzamientos..... 135
Tabla 18. Valores de las hipótesis que lanza el proveedor del bien x_2 para satisfacer la sexta necesidad del agente h_2 138
Tabla 19. Relaciones de los bienes, insumos o servicios incluyendo las variaciones $x_{1.1}$ y $x_{2.1}$..... 144