

ESTUDIO DE UN PROCESO DE INNOVACIÓN UTILIZANDO LA DINÁMICA DE SISTEMAS*

*Jorge Robledo Velásquez***

*Yony Fernando Ceballos****

* Este artículo se deriva del proyecto *Plataforma para el soporte a la evaluación de políticas y a la toma de decisiones en energización de zonas no interconectadas en Colombia*, financiado por Colciencias y GUÍO Español. El artículo se recibió el 19-06-2007 y se aprobó el 20-05-2008.

** Doctor en Estudios de Política Científica y Tecnológica, Science Policy Research Unit (SPRU), University of Sussex, Brighton, Reino Unido, 1995; Magister en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 1988; Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 1980. Profesor asociado de la Escuela de Ingeniería de la Organización, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
Correo electrónico: jrobledo@unalmed.edu.co.

*** Estudiante de la Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Ingeniero de Sistemas e Informática, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2004.
Correo electrónico: fceball@unal.edu.co.

Estudio de un proceso de innovación utilizando la dinámica de sistemas

RESUMEN

Este trabajo busca contribuir al desarrollo de modelos de simulación de procesos de innovación desde la dinámica de sistemas. El caso trabajado es la introducción de tecnologías de generación de electricidad en una comunidad rural en una zona no interconectada de un país en desarrollo, para así centrar el análisis en el papel del gobierno en el proceso de innovación. El modelo propuesto integra conceptos del marco de los medios de vida sostenibles y de la gestión tecnológica, con el fin de capturar los principales componentes estructurales y dinámicos del sistema. A partir del modelo se simulan tres escenarios evolutivos del proceso de introducción de la tecnología, según el nivel de capacidades acumuladas por las organizaciones productivas, mediante distintas dinámicas de aprendizaje: un escenario problema, un escenario de aprendizaje operativo y un escenario de aprendizaje tecnológico. Los resultados muestran el potencial de la simulación con la dinámica de sistemas como una metodología científica que permite integrar diversos componentes teóricos y explorar las causas estructurales del comportamiento de los complejos fenómenos asociados a la innovación.

Palabras clave: dinámica de sistemas, innovación, modelamiento, simulación.

Study of an Innovation Process Using System Dynamics

ABSTRACT

This article seeks to contribute to developing innovation process simulation models that use system dynamics. The situation employed was the introduction of electricity generation technologies into a rural community in a non-interconnected zone in a developing country, to allow focusing on analyzing the government's role in the innovation process. The model proposed integrates means for achieving sustainable life concepts and technology management concepts, in order to capture the main dynamic structural and system components. The model is then used to simulate three evolving scenarios in the technology introduction process, based on the level of capabilities that the productive organizations may achieve through distinct learning dynamics: a problem scenario, an operational learning scenario, and a technological learning scenario. Results show the potential that simulation using system dynamics has to become a scientific methodology that enables integrating different theoretical components and exploring the structural causes of the behavior of the complex phenomena associated with innovation.

Key words: System dynamics, innovation, modeling, simulation.

Introducción: la importancia de simular los procesos de innovación

La innovación es, ante todo, un fenómeno social, originado en la interacción de actores diversos, cuya dinámica es responsable de la producción y transformación del conocimiento científico y tecnológico en riqueza económica, bienestar social y desarrollo humano. Su importancia en la sociedad del conocimiento es tal que en el ámbito de los sistemas de producción de bienes y servicios mercadeables ha sido considerada por el Consejo Estadounidense de Competitividad “*the single most important factor in determining America’s success through the 21st century*” (Council on Competitiveness, 2004, p. 5).

Desde la óptica del desarrollo de las naciones, la importancia de la innovación es incuestionable, y debe ser tenida en cuenta como fenómeno central en la explicación de las dinámicas del desarrollo. Según Freeman (1995), la perspectiva neoclásica tradicional de la economía del desarrollo, fundada en la premisa de la tecnología como factor exógeno de producción, ha sido incapaz de explicar las diferencias de crecimiento entre países y entre regiones –la convergencia y divergencia del desarrollo nacional y regional–.

Por otro lado, desde la economía evolucionista, la explicación se ha abordado desde un enfoque sistémico que pone a la innovación, siguiendo a Schumpeter, como motor del desarrollo económico. En este contexto, Freeman (1987) y Lundvall (1985 y 1988) introdujeron la noción de *sistema nacional de innovación* (SNI), que tiene también dimensiones regionales y sectoriales, como

concepto de alto poder explicativo de las dinámicas de desarrollo. La definición de Freeman hace hincapié en las interacciones institucionales, al referirse al SNI como una red de instituciones de los sectores público y privado, cuyas actividades e interacciones inician, importan, modifican y difunden nuevas tecnologías. Las propuestas de Lundvall desarrollan el concepto en su dimensión de aprendizaje colectivo, como un sistema social, cuya actividad central es el aprendizaje interactivo entre personas y organizaciones.

A partir de los trabajos de Freeman y Lundvall, el concepto de *sistema de innovación* comenzó a ser desarrollado y explorado en sus posibilidades explicativas, respecto a fenómenos complejos de industrialización y desarrollo. Por ello, con frecuencia, llegó a ser adoptado como concepto orientador de la formulación e implementación de políticas públicas (Sharif, 2006). En este sentido, el concepto ha demostrado tener un amplio potencial teórico y aplicado, lo que contribuye a explicar la abundante literatura que se ha generado sobre el tema. Sin embargo, en el marco de esta literatura, centrada en la innovación, llama la atención la escasez de modelos de simulación que tengan como objeto los sistemas y los procesos de innovación. El presente trabajo busca contribuir al desarrollo de este tipo de modelos, enfocándose en un proceso y un contexto institucional determinados.

La escasez de modelos de simulación de sistemas y procesos de innovación no es sorprendente. Como fenómeno social, la innovación es extremadamente compleja. En general, la complejidad de los fenómenos sociales, a diferencia de los fenómenos físicos,

hace que los modelos de simulación contruidos para pronosticar su comportamiento sean muy poco confiables. Sin embargo, como método de investigación científica, la simulación de fenómenos sociales ha demostrado ser bastante exitosa, al revelar importantes relaciones y principios a partir de modelos relativamente simples (Axelrod, 1997).

Con el presente trabajo se busca desarrollar un modelo aplicado a la simulación de un proceso de introducción de una tecnología en un sistema local de innovación, que contribuya a aprehender los elementos e interacciones que gobiernan la dinámica de una comunidad rural aislada, enfrentada al desafío del desarrollo tecnológico para el logro de objetivos comunitarios. El foco analítico de la simulación es el papel del gobierno central (diferente del gobierno local y regional) en el proceso de innovación, aunque las posibilidades de análisis a partir del modelo son mucho más amplias.

Metodológicamente, se trata de modelar una comunidad rural aislada, como un microsistema socioeconómico de innovación, y simular sus trayectorias de evolución bajo distintas formas de participación gubernamental en el proceso, utilizando la *dinámica de sistemas* como una herramienta que ha demostrado ser adecuada para representar este tipo de sistemas socioeconómicos complejos.

1. ¿Por qué la introducción de tecnologías energéticas en comunidades rurales?

El mundo actual es testigo de un desarrollo económico de profundas inequidades. Mien-

tras los países más ricos del hemisferio norte han crecido hasta alcanzar extraordinarios niveles de riqueza, muchos otros países se estancaron en modelos económicos preindustriales, que dan como resultado una distribución desigual de la población y de la riqueza, con dramáticas consecuencias.

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, 2002), en el mundo existen 850 millones de adultos analfabetas (el 14% de población del mundo), 960 millones de personas sin acceso a fuentes de agua potable (el 16%) y 2 mil millones de personas sin acceso a la energía eléctrica (el 33%). Esta situación es socialmente inaceptable y ambientalmente insostenible, y constituye un enorme reto para todas las naciones del mundo.

Por otro lado, existe un amplio consenso en torno a que el desarrollo económico está ligado al desarrollo de la energía (véanse, por ejemplo, Prasad y Villa, 2002; Department for International Development [DFID], 2002), lo cual vincula la superación de las inequidades económicas con una mayor generación y consumo de energía en regiones hasta ahora marginadas. Las proyecciones indican que la demanda energética del mundo en el 2050 puede aumentar drásticamente y que gran parte de este incremento se dará en los países en vía de desarrollo (Prasad y Villa, 2002).

Un porcentaje significativo de esta demanda puede ser atendido con recursos locales, pues es conocido que muchas zonas de países en desarrollo son ricas en fuentes de energía, principalmente renovables (asociadas al sol,

al viento, a la biomasa y a las corrientes y caídas de agua). Sin embargo, estas posibilidades contrastan con la situación real. Efectivamente, estas zonas exhiben la paradoja de experimentar gran escasez de energía a pesar de la abundancia de fuentes de energía (Prasad y Villa, 2002). Esta paradoja plantea la existencia de barreras que se levantan entre las fuentes de energía y la real posibilidad de acceder a ellas. Por lo tanto, estas barreras—financieras y no financieras—deben ser identificadas y entendidas para orientar el diseño de políticas y estrategias para una incorporación creativa de alternativas tecnológicas socialmente viables y ambientalmente sostenibles.

El problema del desarrollo sostenible de las comunidades rurales con dificultades energéticas y económicas ha sido tema de numerosos estudios en el mundo, tanto desde el punto de vista del desarrollo de diversas tecnologías como de programas orientados a la sustitución, uso y aprovechamiento de alternativas energéticas sostenibles. Varios de esos estudios y programas han sido propiciados por las políticas del United Nations Environment Programme (UNEP) e impulsados a través de iniciativas puntuales financiadas por esta misma entidad, como The Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD). Otras iniciativas han sido desarrolladas con la colaboración de gobiernos, entidades sin ánimo de lucro o empresas privadas, como es el caso de The Global Village Energy Partnership (GVEP), la European Union Initiative for Poverty Eradication and Sustainable Development (EU Energy Initiative) y el programa británico Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership (REEEP).

Una de tales iniciativas internacionales es el programa Renewable Energy Technology and Sustainable Livelihoods (RESURL), liderado por el Imperial College inglés, con la participación de investigadores de Cuba, Perú y Colombia, y el apoyo financiero del DFID, del Reino Unido. Por Colombia participa la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. El presente trabajo da cuenta del componente de gestión tecnológica de un proyecto que busca contribuir al programa RESURL y que cuenta con la cofinanciación del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (Colciencias) y la empresa de consultoría GUÍO Español.

Desde la perspectiva de la gestión tecnológica desarrollada aquí, se hace hincapié en la importancia de las capacidades asociadas al dominio de una determinada tecnología energética para su introducción exitosa en un contexto comunitario rural. El caso particular de aplicación se refiere a la energía eléctrica, como un tipo de energía fundamental que puede ser generada empleando varias alternativas no convencionales (micro y minicentrales hidroeléctricas, paneles solares, generadores eólicos, entre otras), que puede ser transportada y distribuida fácilmente y que posee múltiples posibilidades de aplicación.

En este sentido, se plantea la necesidad de comprender la dinámica de la relación entre la comunidad y sus medios de vida, las organizaciones y sus capacidades, las tecnologías (tanto para la generación de energía eléctrica como para su utilización productiva) y las políticas públicas que afectan a la comunidad, para lo cual se asume una perspectiva sistémica.

mica y se propone un modelo de dinámica de sistemas.

2. Problemas de acceso y utilización de las tecnologías energéticas

La disponibilidad de energía es un factor crítico de desarrollo; sin embargo, el acceso a las tecnologías energéticas por parte de las comunidades rurales es problemático, ya sea porque son demasiado costosas, porque algunas causan impactos indeseables en lo ambiental y cultural, porque las tecnologías exigen condiciones naturales especiales no siempre disponibles o porque, finalmente, las comunidades no logran garantizar su adecuada operación y utilización productiva y sostenible.

Al respecto, la literatura sobre el tema revela un cúmulo significativo de conocimiento y experiencia sobre los problemas asociados a la introducción de estas tecnologías en comunidades rurales apartadas (véanse, por ejemplo, Karekezi, 1995; Weingart, 2003; Sudhakara y Balachandra, 2004; UNDP, 2000; Forcano, 2003; Global Network on Energy for Sustainable Development [GNESD], 2007). Tradicionalmente, estos problemas y sus alternativas de solución son abordados de manera sistemática mediante evaluaciones que, por lo general, se enfocan en las dimensiones financiera, tecnológica, socioeconómica y ambiental.

Sin embargo, varios hallazgos indican que a pesar de evaluaciones positivas de este tipo, con frecuencia, la introducción de tecnologías energéticas fracasa, porque las comunidades y sus organizaciones productivas

no son capaces de garantizar la operación y la explotación de las tecnologías de forma sostenible. Por desgracia, hay dificultades de tipo teórico y metodológico para evaluar esta dimensión del problema.

El presente trabajo busca hacer una contribución de carácter teórico y metodológico en esta dirección, explorando la posibilidad de utilizar el conocimiento y la experiencia que desde la gestión tecnológica se ha acumulado sobre el desarrollo y utilización de la tecnología con fines productivos, en combinación con los aportes conceptuales de la perspectiva de los medios de vida sostenibles y la riqueza teórica y metodológica de la dinámica de sistemas.

Particularmente, es del interés de los autores profundizar en las dinámicas de acumulación de capacidades organizacionales en el contexto de un microsistema de innovación, representado por una comunidad rural aislada, sus relaciones con los capitales social y humano de la comunidad y el efecto en distintas formas de participación gubernamental. Se sugiere que estos conceptos y sus relaciones son claves para entender los fenómenos que emergen cuando este tipo de microsistemas se enfrenta al desafío de introducir y explotar exitosamente una o varias tecnologías energéticas, que buscan elevar su riqueza económica, el bienestar social y el desarrollo humano.

3. Tecnología y capacidades

Desde una concepción integral que supera las tradicionales visiones reduccionistas, la tecnología no se agota en la dimensión tan-

gible del artefacto o la máquina; por el contrario, la tecnología es, ante todo, un fenómeno social y humano. En palabras de Pitt, “*technology is humanity at work*” (2000, p. 11). Es decir, la tecnología no se reduce a las máquinas, a los equipos y a las instalaciones físicas que sirven para transformar materias primas, insumos y componentes en bienes y servicios. La tecnología es también información, conocimiento, experiencia, habilidades y relaciones que, en el contexto de las organizaciones y en conjunto con los elementos tangibles mencionados, conforma un cuerpo de capacidades dotadas de sentido, al crear posibilidades de decisión y acción para el logro de objetivos socialmente reconocidos.

Desconocer las dimensiones social y humana de la tecnología, es reducirla a un agregado de aparatos y estructuras físicas que rápidamente puede ser desdeñado o rechazado por la comunidad, como un cuerpo extraño. Por desgracia, en los procesos de introducción de nuevas tecnologías es común que la atención se concentre en sus elementos tangibles y que se pasen por alto las capacidades organizacionales que dan cuenta de las posibilidades de una real apropiación social de las tecnologías y de su posterior mejoramiento y transformación.

El margen de decisión y las posibilidades de acción creadas por las capacidades organizacionales son características de estas, que las identifican como tales (Winter, 2000). Sin capacidades, las organizaciones productivas ven mermadas sus opciones de decisión y acción para el logro de sus objetivos. Por otra parte, como es bien sabido en contextos empresariales, la acumulación de capacida-

des no resulta meramente de la acción de los mercados:

[T]he term ‘capability’ emphasizes the key role of strategic management in appropriately adapting, integrating, and re-configuring internal and external organizational skills, resources, and functional competences toward changing environment. (Teece y Pisano, 1994, p. 538)

En las organizaciones de las comunidades de interés para el presente trabajo, esto sugiere que la acumulación de capacidades no sólo es una condición para el logro de determinados objetivos, sino que presupone la actuación consciente y dirigida de sus líderes para poner en marcha el tipo de procesos mencionados por Teece y Pisano y que más adelante se denomina *procesos de aprendizaje*.

Aunque la naturaleza de las capacidades organizacionales sigue siendo un tema debatido en la literatura especializada, es suficientemente claro que están asociadas con las posibilidades de las organizaciones para abordar de manera satisfactoria la solución de los problemas que surgen en el proceso de introducción y utilización de una nueva tecnología. En este sentido, la existencia de capacidades asegura la superación de los problemas que emergen en el proceso, lo que da como resultado la incorporación exitosa de la tecnología.

Al respecto, es necesario reconocer distintas posibilidades de “éxito” según el nivel de expectativas sobre el desempeño de la tecnología. Un nivel de desempeño podría referirse, por ejemplo, al establecido por las

especificaciones técnicas del proveedor de la tecnología, para lo cual las capacidades requeridas podrían estar asociadas a funciones básicas de operación y mantenimiento; otro nivel podría referirse a la optimización del desempeño de la tecnología, que desarrolla sus potencialidades más allá de la línea de referencia establecida por las condiciones normales de explotación. Obviamente, cada situación involucra un tipo distinto de capacidades que es necesario identificar.

Para abordar este asunto, aquí se adopta la aproximación sugerida por Bell (1984), en el sentido de diferenciar las capacidades operativas –aquellas que permiten mantener operativa una tecnología– de las capacidades tecnológicas –aquellas que permiten dominar y dirigir el cambio técnico–. En consecuencia, es posible identificar distintos escenarios evolutivos del proceso de introducción de una nueva tecnología, según el nivel de capacidades que las organizaciones logren acumular en función de los distintos procesos de aprendizaje tecnológico puestos en marcha, como se verá en la sección siguiente.

4. Aprendizaje y desempeño tecnológico

El aprendizaje puede considerarse la forma mediante la cual las organizaciones construyen y desarrollan capacidades; en este sentido, más allá de un aprendizaje elemental asociado automáticamente con la experiencia operativa, que agota rápidamente sus posibilidades de desarrollo organizacional (Bell, 1984), el aprendizaje requiere esfuerzos deliberados y un enfoque estratégico para responder a desafíos competitivos, tecnoló-

gicos y regulatorios del entorno (Dodgson, 1991a).

La importancia del aprendizaje y la insuficiencia de mecanismos de mercado para la acumulación de capacidades organizacionales conducen a la pregunta por las fuentes del aprendizaje. A este respecto, la literatura reporta varios posibles canales identificados genéricamente como procesos *learning-by*, entre los cuales los más representativos son el *learning-by-doing* (Arrow, 1962), o aprendizaje resultado de la experiencia productiva; el *learning-by-changing* (Bell, 1984), o aprendizaje resultado de la introducción de cambios experimentales y controlados a los procesos y productos; el *learning-by-using* (Rosenberg, 1982), o aprendizaje resultado de las aplicaciones que hacen los usuarios de un producto; el *learning-by-hiring* y *learning-by-training*, o aprendizaje asociado con la contratación, vinculación, capacitación y entrenamiento de personal; el *learning-by-searching* y *learning-by-R&D* (Cohen y Levinthal, 1989), o aprendizaje que resulta de actividades de investigación y búsqueda sistemática de información, y el *learning-by-collaborating* (Dodgson, 1991b), o aprendizaje resultado de la colaboración entre personas y organizaciones.

Dependiendo de los procesos de aprendizaje puestos en marcha por las organizaciones, se podrían alcanzar distintas capacidades para lograr los objetivos de desempeño asociados con una determinada tecnología. El Gráfico 1 muestra el efecto de tales procesos de aprendizaje. Básicamente, se identifican tres escenarios posibles: el escenario problema (L_1 - L_3), el escenario de aprendizaje operati-

vo (L_1-L_2) y el escenario de aprendizaje tecnológico, que podría descomponerse en un escenario de mejoramiento continuo (L_1-L_4) y en un escenario de innovación (L_1-L_5). La línea L_0-L_0 corresponde al desempeño nominal de la tecnología según las especificaciones técnicas del proveedor. Por lo general, el desempeño inicial es algo inferior al nominal (L_1), pero la brecha se va cerrando a medida que la organización acumula capacidades mediante procesos de aprendizaje.

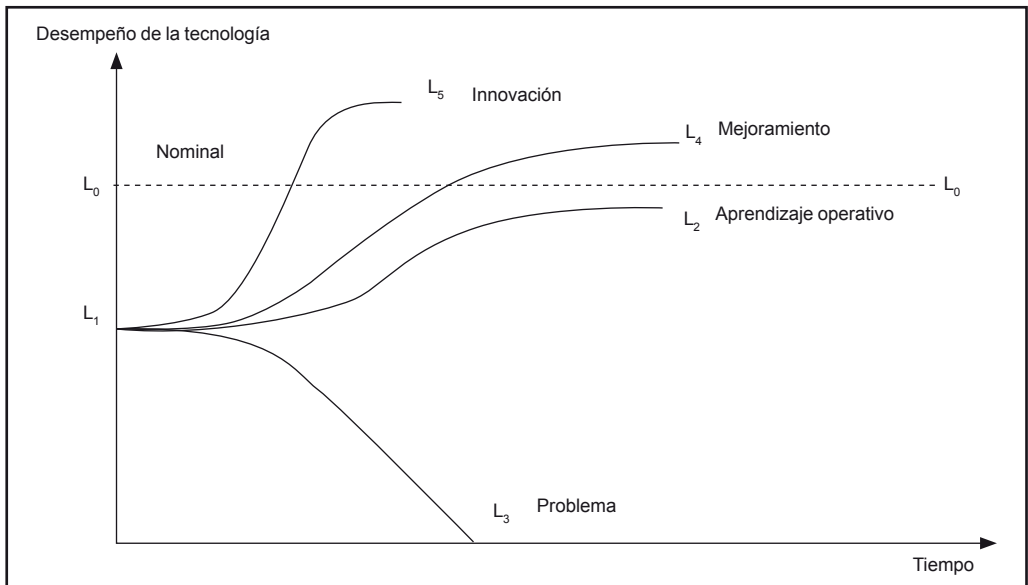
El escenario problema (L_1-L_3) se presenta cuando las capacidades de la organización productiva son insuficientes para garantizar la operación sostenida de la tecnología, a pesar de la existencia de otras condiciones favorables. En la práctica, esta situación termina con el paro permanente de la tec-

nología por problemas insuperables de tipo operativo o de mantenimiento. Por desgracia, este escenario es frecuente en el caso de las tecnologías energéticas, incluso en aquellas situaciones en que la tecnología ha sido bien seleccionada, la evaluación financiera arroja resultados positivos y las licencias ambientales son otorgadas al proyecto.

El escenario de aprendizaje operativo (L_1-L_2) se alcanza cuando la organización logra garantizar la operación sostenida de la tecnología durante su vida útil y genera valor agregado a partir de su aplicación productiva. En este caso, los procesos de aprendizaje, principalmente del tipo *learning-by-doing*, elevan el desempeño inicial de la tecnología a niveles que se aproximan con el tiempo al valor de referencia.

Gráfico 1

Escenarios de desempeño tecnológico como resultado de distintos procesos de aprendizaje



Fuente: elaboración propia.

El escenario de mejoramiento continuo ($L_1 - L_4$) se presenta cuando se logran introducir, de manera continua, mejoras incrementales a la tecnología, lo cual implica poner en juego procesos de aprendizaje que van más allá del *learning-by-doing*, del tipo *learning-by-changing*, *learning-by-hiring* y *learning-by-training*. Como resultado de la aplicación de las capacidades acumuladas se obtiene, principalmente, un aumento en la eficiencia operativa de la planta de producción y, por ende, una mayor productividad o un menor consumo de insumos por producto terminado, o ambos. También es posible lograr una mejora en la calidad de bienes y servicios (B/S).

El escenario de innovación ($L_1 - L_5$) implica la introducción de novedades o mejoras significativas a los productos, procesos y métodos organizativos y de mercadeo relacionados con la generación de energía y su uso en la producción de B/S, en términos semejantes a los propuestos por el *Manual de Oslo* (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2005). Sin embargo, y guardadas las debidas proporciones, la introducción de una tecnología energética nueva para una comunidad podría llevar a lo que Freeman y Pérez (1988) denominan *innovaciones de sistemas tecnológicos*, las cuales son innovaciones de amplio espectro y profundo impacto económico y social; en este caso en relación con la comunidad rural afectada.

En lo fundamental, estas innovaciones involucran conjuntos interrelacionados de innovaciones tecnológicas, innovaciones institucionales e innovaciones organizacionales y de gestión que cambian sustancialmente el mercado, los sistemas de producción, las ca-

pacidades tecnológicas que les sirven de base y las reglas de la competencia dominantes hasta el momento. Esto es, precisamente, lo que suele suceder con la introducción de una nueva tecnología energética en una comunidad rural aislada.

5. Objetivos comunitarios y medios de vida sostenibles

La introducción de una tecnología en una comunidad no es, en sí misma, un objetivo. Si la comunidad no tiene claridad sobre el papel de la tecnología en el logro de objetivos comunitarios últimos (por ejemplo, satisfacción de necesidades básicas, mitigación de problemas medioambientales, mayor autonomía, etc.), la tecnología deja de ser percibida como una solución y es rápidamente abandonada. Solamente cuando hay una fuerte conexión entre la tecnología y el logro de objetivos comunitarios, adquieren sentido los esfuerzos deliberados que tiene que hacer la comunidad para poner en marcha y sostener los procesos de aprendizaje organizacionales responsables del desempeño adecuado de la tecnología.

Se requiere, entonces, una forma general de representar los objetivos comunitarios y de medir su logro. Para el efecto, en el presente trabajo se adopta el marco de los medios de vida sostenibles, en cuya perspectiva los objetivos comunitarios pueden resumirse en alcanzar balances y niveles satisfactorios de un conjunto sostenible de activos, potencialidades y actividades de la comunidad, que le sirven como medios de vida. Según el DFID del Reino Unido, el concepto de sostenibilidad se refiere a la posibilidad de que los medios de vida soporten tensiones y choques y

puedan recuperarse de ellos, manteniendo y mejorando sus posibilidades hacia el futuro, sin dañar la base de recursos naturales existentes (DFID, 2003).

En el marco conceptual desarrollado por el Rural Livelihoods Advisory Committee se identifican cinco categorías de capitales que sustentan los medios de vida, a saber: el capital natural, el capital físico, el capital financiero, el capital social y el capital humano –estos dos últimos integrados, en lo sucesivo, bajo la expresión *capitales social y humano*– (Cuadro 1).

6. Un modelo de dinámica de sistemas para el proceso de innovación

Para avanzar en la conexión teórica entre el marco de los medios de vida sostenibles

–que proporciona una herramienta versátil de planificación y gestión del desarrollo de las comunidades– y el marco teórico propuesto arriba desde la gestión tecnológica –basado en el mantenimiento, reconfiguración y creación de capacidades organizacionales mediante procesos de aprendizaje para la introducción y utilización exitosa de tecnologías–, se sugiere una relación básica entre capitales comunitarios y capacidades organizacionales, en el contexto de una comunidad rural donde son significativas las políticas públicas, la generación y el consumo de energía y la producción de valor agregado en forma de B/S con significado para la comunidad. Para ello se propone un modelo causal de tipo sistémico que se sustenta en las siguientes consideraciones:

Primera. Las capacidades organizacionales (operativas y tecnológicas) se acumulan co-

Cuadro 1

Composición de los capitales según el marco de los medios de vida sostenibles

Capital humano	Aptitudes, conocimientos, capacidades laborales o niveles de formación, potencial de liderazgo y estatus sanitario, que en conjunto permiten a las poblaciones entablar distintas estrategias y alcanzar sus objetivos en materia de medios de vida
Capital natural	Son la base natural (bosques, recursos marinos/silvestres, agua, calidad del aire) con la que se obtienen todos o parte de los flujos de servicios útiles en materia de medios de vida (i. e. ganadería, pesca, recolección de madera, extracción mineral, etc.)
Capital social	Recursos sociales en los que las comunidades se apoyan en la búsqueda de sus objetivos en materia de medios de vida. Facilitan la cooperación, reducen costos de transacción y proporcionan la base para crear confianza, reciprocidad e intercambio
Capital físico	Comprende la infraestructura y los medios de producción necesarios para que las poblaciones satisfagan sus necesidades básicas y sean más productivas (medios de transporte asequibles, alojamientos y edificios seguros, suministro de agua y saneamiento adecuados, energía limpia y asequible y acceso a la información y a las comunicaciones)
Capital financiero	Son los recursos financieros que las poblaciones utilizan para lograr sus objetivos en materia de medios de vida. Las fuentes principales son: las partidas disponibles o ahorros (dinero, depósitos bancarios o activos líquidos como el ganado o las joyas) o créditos, y las entradas regulares de dinero (pensiones u otros pagos realizados por el Estado y remesas)

Fuente: DFID (2003).

mo resultado de procesos de aprendizaje, que a su vez son posibilitados por los capitales social y humano de la comunidad. El componente social de este capital aporta las redes y conexiones, las organizaciones formales, las relaciones de confianza, la reciprocidad y el intercambio, que convierten a la comunidad en un sistema social en el cual sus agentes están en interacción mutua y con entidades externas. Entre tanto, el componente humano, la base de aptitudes, conocimientos y competencias laborales de los individuos.

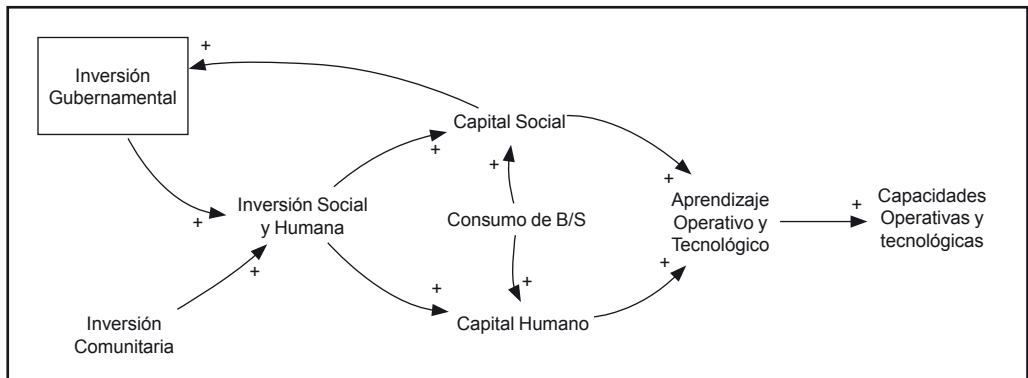
Por su parte, los capitales social y humano que las organizaciones requieren para sostener procesos de aprendizaje son el resultado

de una adecuada inversión social gubernamental y de la eficiencia de la comunidad en transformar los B/S que ella misma produce en aptitudes, conocimientos y competencias laborales individuales, redes, conexiones, organizaciones y relaciones de confianza, reciprocidad e intercambio, adecuadas para una exitosa introducción de las tecnologías.

A su vez, una comunidad con suficiente capital social estará en mejor posición de interactuar con el gobierno central para lograr una mayor inversión social (véase Gráfico 2; para la descripción de las variables, véase el Cuadro 2).

Gráfico 2

Dinámica causal entre los capitales social y humano, inversión gubernamental y comunitaria, aprendizajes y capacidades operativas y tecnológicas



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 2

Descripción de las principales variables del modelo

Variable	Descripción
Aprendizaje operativo y tecnológico PE/aprendizaje operativo y tecnológico B/S	Medida del aprendizaje operativo y tecnológico asociado a la planta de producción de energía eléctrica (PE)/a la producción de B/S. Esta variable puede aparecer desagregada en aprendizaje operativo, por una parte, y aprendizaje tecnológico, por la otra
Capacidades operativas y tecnológicas PE/capacidades operativas y tecnológicas B/S	Medida de las capacidades operativas y tecnológicas asociadas a la planta de producción de energía eléctrica/a la producción de B/S. Esta variable puede aparecer desagregada en capacidades operativas, por una parte, y capacidades tecnológicas, por la otra
Capital financiero	Medida del capital financiero (Cuadro 1)
Capital humano	Medida del capital humano (Cuadro 1)
Capital social	Medida del capital social (Cuadro 1)
Consumo (comunitario) de B/S	Medida del consumo comunitario de B/S producidos a partir de la energía eléctrica
Deuda financiera	Deuda que adquiere la comunidad con la planta eléctrica
Dificultad operativa PE/dificultad operativa B/S	Medida de la dificultad de dominar la operación de la planta de energía eléctrica/ de la producción de B/S
Dificultad tecnológica PE/dificultad tecnológica B/S	Medida de la dificultad de dominar el cambio tecnológico en la planta de producción de energía eléctrica/en los procesos de producción de B/S
Excedente comercial de B/S	Medida de los excedentes de B/S que son comercializados, luego de la satisfacción de la demanda interna de la comunidad.
Experiencia productiva	Medida de la experiencia acumulada, tanto en la producción de energía eléctrica como en la producción de B/S
Innovación PE/innovación B/S	Medida de las innovaciones introducidas a la planta de energía eléctrica/a la producción de B/S
Inversión comunitaria	Inversión en capital social y capital humano hecha por la comunidad a partir de los excedentes financieros de la comercialización de B/S
Inversión gubernamental (en CSyH)	Inversión del gobierno central en capitales social y humano (CSyH)
Inversión social y humana	Suma de la inversión gubernamental y la inversión comunitaria
POM PE/POM B/S	Problemas de operación y mantenimiento (POM) (referidos a la planta eléctrica y a la producción de B/S, respectivamente)
Potencia eléctrica disponible	Potencia eléctrica de que puede generar la planta para la satisfacción de la demanda de la comunidad
Problemas de operación y mantenimiento PE / problemas de operación y mantenimiento B/S	Variable que simula la aparición de problemas de operación y mantenimiento en la planta de energía eléctrica/en la producción de B/S

Continúa

Variable	Descripción
Producción potencial de B/S	Medida de la cantidad de B/S que sería posible producir con suministro pleno de energía eléctrica
Producción real de B/S	Medida de la cantidad de B/S que produce la comunidad con la energía eléctrica realmente disponible
Solución de problemas PE/solución de problemas B/S	Medida de la solución de problemas de operación y mantenimiento de la planta de energía eléctrica/de la producción de B/S
Subsidio gubernamental	Aporte financiero del gobierno central para mitigar el impacto de la deuda financiera adquirida por la comunidad con la planta eléctrica

Fuente: elaboración propia.

Segunda. Dependiendo del tipo particular de tecnología energética, esta presentará grados determinados de dificultad operativa y de dificultad tecnológica. La dificultad operativa está asociada con la frecuencia y la gravedad de los problemas operativos que surgen en la producción de energía. El surgimiento de tales problemas es fundamentalmente aleatorio y su solución, a medida que aparezcan, garantizará la operación estable del proceso productivo, ya que se logrará un buen desempeño de la tecnología y, por lo tanto, niveles adecuados de potencia eléctrica, disponible para la comunidad.

Por su parte, la dificultad tecnológica establece mayores exigencias a la organización y a la comunidad para mejorar significativamente, innovar y expandir la tecnología energética y, por consiguiente, aumentar la capacidad instalada del proceso. Tanto la solución de los problemas operativos como las posibilidades de mejora, innovación y expansión dependen de las capacidades que haya acumulado la organización; en el primer caso de tipo operativo (capacidades operativas energéticas), y en el segundo, de tipo tecnológico (capacidades tecnológicas energéticas).

Como resultado, las capacidades operativas energéticas determinan las posibilidades de resolver los problemas operativos y garantizar la operación estable del proceso de producción de energía, y las capacidades tecnológicas energéticas determinan las posibilidades de mejora significativa, innovación y expansión del proceso (véase Gráfico 3; para la descripción de las variables, véase el Cuadro 2).

Tercera. La capacidad instalada nominal (potencia eléctrica nominal) del proceso de producción de energía eléctrica está definida por sus especificaciones técnicas, por lo cual es un parámetro dado. Sin embargo, la potencia eléctrica disponible puede incrementarse por encima de la potencia nominal como resultado de la innovación y la expansión del proceso. En la aplicación bajo estudio, considerando el nivel máximo de capacidades tecnológicas que razonablemente puede acumular la organización productiva, se estima que la potencia disponible no superará el 5% de la potencia nominal, como resultado de innovaciones incrementales de proceso. Por otra parte, la potencia eléctrica disponible puede ser menor que la nominal, pues alcanzar el valor nominal depende del

desempeño operativo de la planta (particularmente de los procesos *learning-by-doing*), como se explicó arriba.

Cuarta. La potencia eléctrica disponible es utilizada por otras organizaciones productivas de la comunidad para la producción de B/S, según un proceso de transformación que depende de:

- Un factor de utilización, que define el porcentaje de la energía que es explotada productivamente respecto al total de energía que sería posible generar utilizando la potencia disponible.
- El costo promedio de la energía para sus consumidores.
- Un factor de intensidad eléctrica, que define el porcentaje de participación del costo de la energía en el costo de la producción agregada de B/S.
- La intensidad de valor agregado, que establece el porcentaje del costo agregado de producción que representa el valor agregado en el proceso de producción.

De esta forma, dada una determinada estructura productiva de una comunidad, el valor diario de los B/S que la comunidad puede producir con la potencia eléctrica disponible es:

Producción diaria de B/S [\$] = (24 [h] × potencia eléctrica disponible [KW] × factor de utilización de la potencia disponible [%] × costo de la energía [\$/KWh] / actor intensidad eléctrica [%]) × (1 + intensidad de valor agregado [%])

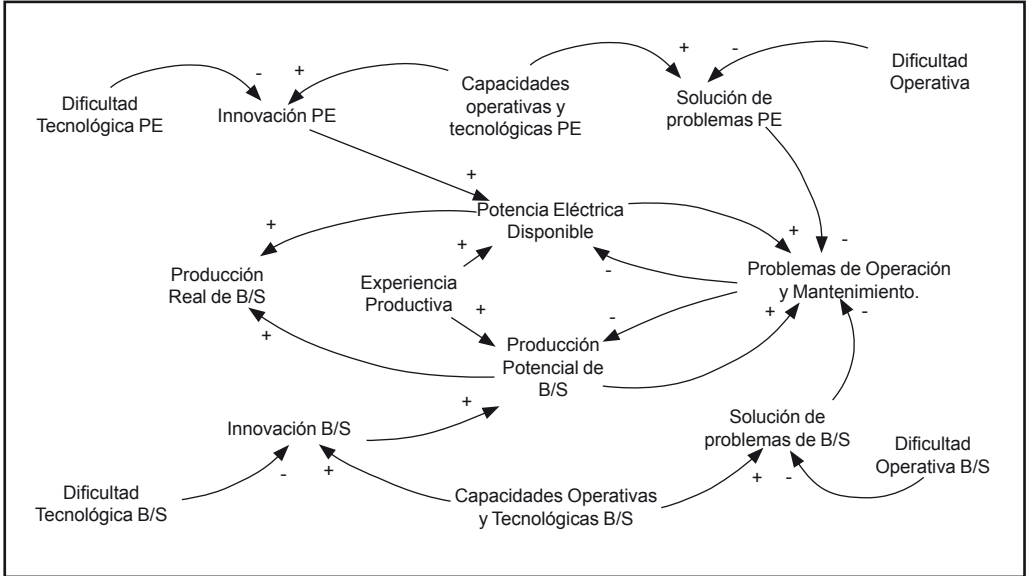
La producción de B/S a partir de la potencia eléctrica disponible sigue una dinámica similar a la producción de energía, en su relación con las capacidades operativas y tecnológicas que requieren las organizaciones para la producción de tales B/S. En ausencia de capacidades adecuadas, las organizaciones fracasarán en su intento de transformar la energía eléctrica en B/S. En la práctica, la producción real de B/S está limitada, ya sea por la disponibilidad de potencia eléctrica (cuando esta es menor que la demanda de electricidad para producir B/S) o por el potencial productivo de B/S de la comunidad—cuando la potencia eléctrica disponible es suficiente para atender la demanda— (Gráfico 3).

Quinta. Una parte de la producción de B/S es consumida por la comunidad (su consumo final satisface necesidades y requerimientos de la comunidad pero no incrementa su capital financiero), mientras que la otra parte se utiliza comercialmente para generar ingresos financieros para la comunidad, en una relación dada por un factor de distribución de la producción de B/S. El consumo de B/S por la comunidad contribuye directamente a aumentar sus capitales social y humano, en tanto que el excedente comercial de B/S lo hace vía el capital financiero.

En este sentido, el capital financiero de la comunidad asociado a la tecnología energética puede aumentar si la comunidad logra transformar parte de la energía generada en B/S comerciales, que signifiquen ingresos financieros netos para la comunidad. Ello depende, sin embargo, de la intensidad de valor agregado de los B/S comercializados—una mayor intensidad de valor agregado

Gráfico 3

Dinámica causal entre las capacidades operativas y tecnológicas y la producción potencial y real de B/S



Fuente: elaboración propia.

significa unos mejores términos de intercambio y, por lo tanto, mayores ingresos financieros netos—.

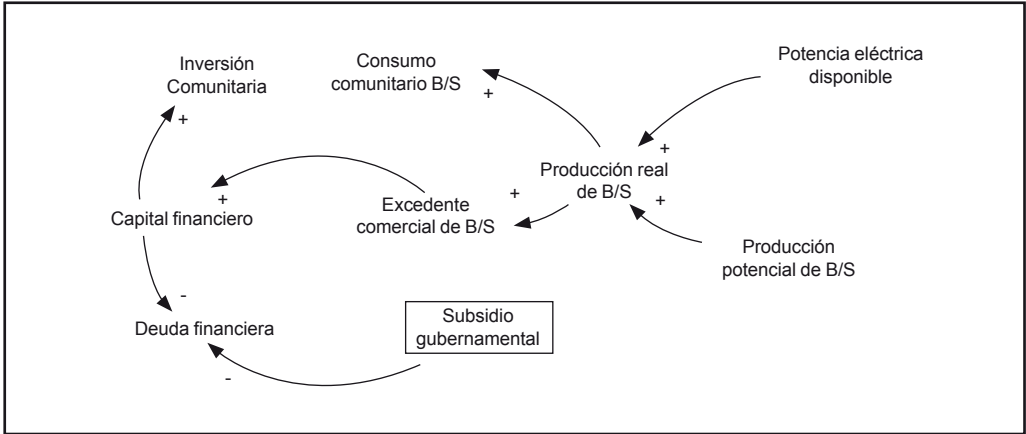
También hay que tener en cuenta que el capital financiero disminuye como resultado de las amortizaciones que la comunidad debe hacer para pagar la deuda generada por la inversión inicial necesaria para introducir la tecnología energética. La variación del capital financiero está dada por el balance de estos aumentos y disminuciones, así como de otros ingresos y egresos posibles que lo afectan —por ejemplo, subsidios financieros del gobierno central e inversión social comunitaria a partir de los excedentes financieros— (Gráfico 4; para la descripción de las variables, véase el Cuadro 2).

Sexta. Respecto a la dinámica financiera, es necesario aclarar que el modelo está elaborado en una perspectiva económica de planificación de la producción de energía eléctrica, no de libre mercado. Por lo tanto, se excluyen las dinámicas de mercado mediadas por el precio de la energía eléctrica y basadas en la tensión entre oferta, demanda, consumo y producción. En general, los escenarios planificados prevén unas posibilidades de producción de B/S que, bajo una determinada estructura de demanda, define los niveles de oferta y consumo y el precio de tales B/S.

Es importante subrayar que esta consideración no es meramente un artificio para simplificar el modelo; en cambio, responde a la real situación de muchas de las comunidades

Gráfico 4

Dinámica causal entre la producción de B/S, la generación de capital financiero y el subsidio gubernamental a la inversión en capital físico asociado a la tecnología energética



Fuente: elaboración propia.

que experimentan iniciativas de introducción de tecnologías energéticas para apalancar su desarrollo. Ciertamente, los mercados energéticos se han venido transformando desde mediados de los años noventa, al abandonar los regímenes de planificación imperantes hasta entonces y al dar paso a contextos institucionales y normativos que favorecen la privatización de la oferta y la competencia por atender segmentos de la demanda.

Sin embargo, esto es principalmente cierto en los grandes centros de consumo; las pequeñas comunidades rurales, aisladas de los sistemas interconectados de electricidad, todavía conservan contextos institucionales y normativos afines a la perspectiva de planificación, en los que la presencia y acción de los gobiernos central y local son fundamentales.

Séptima. En este sentido, el papel del gobierno merece una consideración adicional.

Para empezar, la inversión gubernamental en capital físico (considerada en el modelo propuesto mediante la variable *subsidio gubernamental*) es un componente del sistema que se considera de naturaleza exógena y se asocia con el punto de partida del proceso. Sin embargo, esta no es una circunstancia forzada o meramente abstracta para el desarrollo del modelo, sino que corresponde a lo que usualmente sucede en la realidad: el proceso se desata a partir de una decisión gubernamental de desarrollar la capacidad de producción de energía eléctrica de una comunidad en una zona rural no interconectada, como una decisión de política pública que conlleva un componente de subsidio.

Por otra parte, el modelo contempla, como ya se indicó, la inversión social gubernamental (referida a la educación, la salud, la recreación, las relaciones sociales y el fortalecimiento de las organizaciones, principal-

mente), que se expresa mediante la variable *inversión gubernamental*. Sin embargo, no solamente se contemplan subsidios e inversiones exógenos provenientes del gobierno, sino que estos son complementados con inversión comunitaria generados por el sistema de manera endógena, mediante procesos de producción de B/S y de transformación parcial en los capitales social y humano.

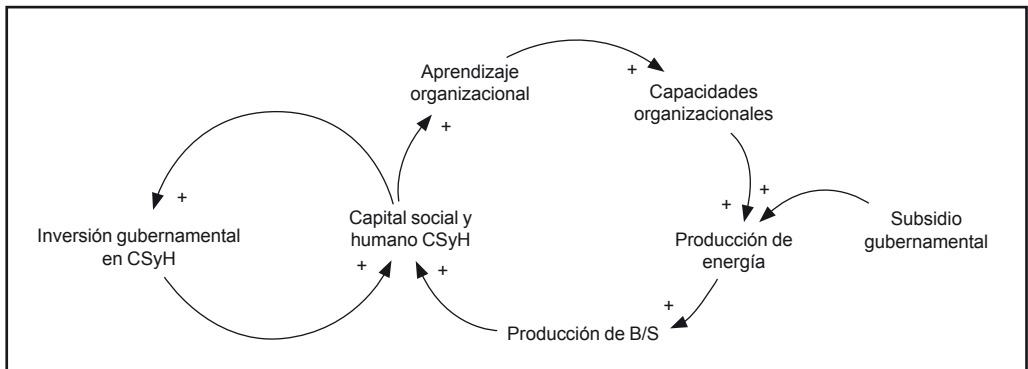
La concepción del modelo incluye también un bucle de retroalimentación que implica una afectación de la inversión gubernamental a partir del capital social acumulado por la comunidad, como una expresión de la mayor capacidad de interlocución y negociación de las organizaciones sociales y políticas locales con las entidades gubernamentales centrales. Bajo estas consideraciones, los elementos más relevantes del papel del gobierno en el sistema se representan de manera simplificada y esquemática en el Gráfico 5.

Octava. Finalmente, algunas observaciones sobre los capitales físico y natural que, aun

cuando no intervienen en la dinámica del fenómeno modelado de manera significativa, este sí los afecta. Por parte del capital físico asociado a las tecnologías energéticas y productivas, si bien comienza en un valor alto, que refleja las inversiones iniciales en infraestructura y equipo, luego se somete a un proceso de depreciación en el tiempo, que hará que disminuya si la comunidad no hace inversiones de renovación y expansión.

Por su parte, el balance del capital natural puede ser positivo, en ciertos casos. En efecto, una mayor dinámica económica bajo criterios equilibrados de producción y sostenibilidad ambiental puede conservar el capital natural de la comunidad, incluso aumentarlo; esto último puede suceder, por ejemplo, cuando los medios de vida se mejoran de tal manera que disminuye la presión sobre los recursos naturales causada por la ignorancia y las prácticas inadecuadas de producción: desertificación, por sobrepastoreo y uso inadecuado de la tierra en la agricultura; contaminación de las fuentes de agua, por dispo-

Gráfico 5
Papel del gobierno en el sistema



Fuente: elaboración propia.

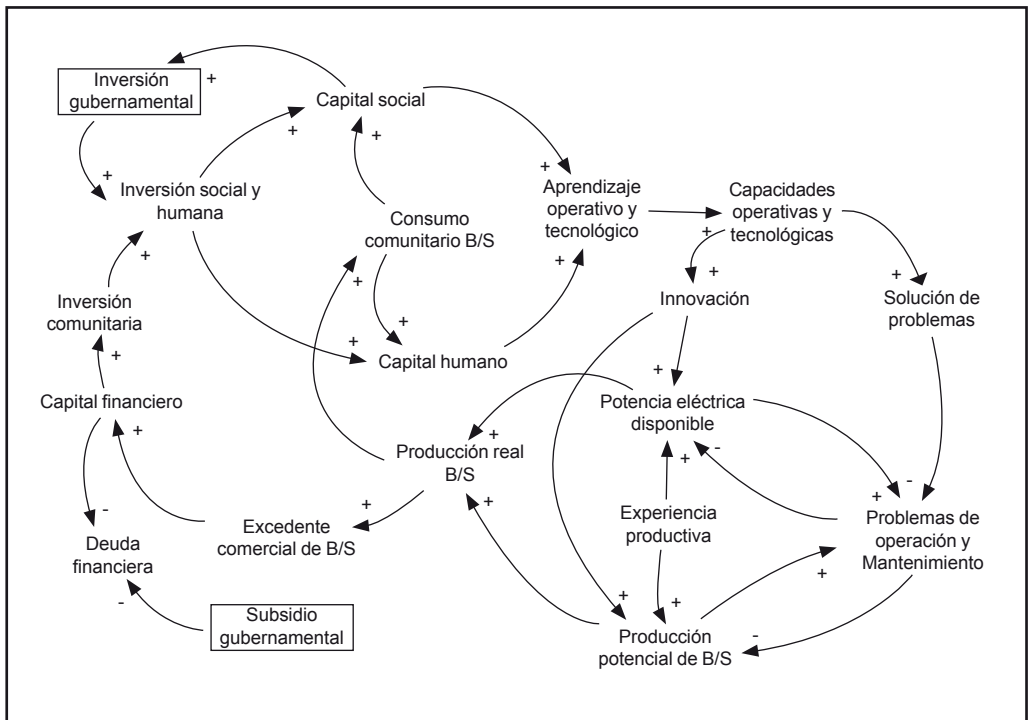
sición inadecuada de los residuos y subproductos; disminución de la vida silvestre, por caza no controlada o exterminio sistemático de especies; explotación inadecuada de las reservas naturales de madera; daño a los bosques por excesiva extracción de leña; etc.

El Gráfico 6 presenta el diagrama causal completo del microsistema de innovación que modela la dinámica de introducción de una tecnología energética a una comunidad rural aislada (las variables son descritas en el Cuadro 2).

7. Escenarios de simulación del modelo y resultados

Con base en el diagrama causal del Gráfico 6, se obtienen los diagramas de flujos y niveles de los gráficos 7 y 8, que indican el tipo de relaciones matemáticas entre variables, como es usual en dinámica de sistemas. En el caso particular de las variables relacionadas con el capital financiero –por ejemplo, la dinámica causal del Gráfico 4 y el diagrama de flujos y niveles del Gráfico 7– se interpretan de la siguiente manera:

Gráfico 6
Diagrama causal simplificado del microsistema de innovación para introducir tecnologías energéticas



Fuente: elaboración propia.

El capital financiero está definido por el balance entre las variables que lo hacen aumentar y disminuir:

Aumenta por integración en el tiempo de la variable ingresos comunitarios, resultado de la producción excedente de B/S convertida a unidades financieras mediante un coeficiente de intensidad de valor agregado.

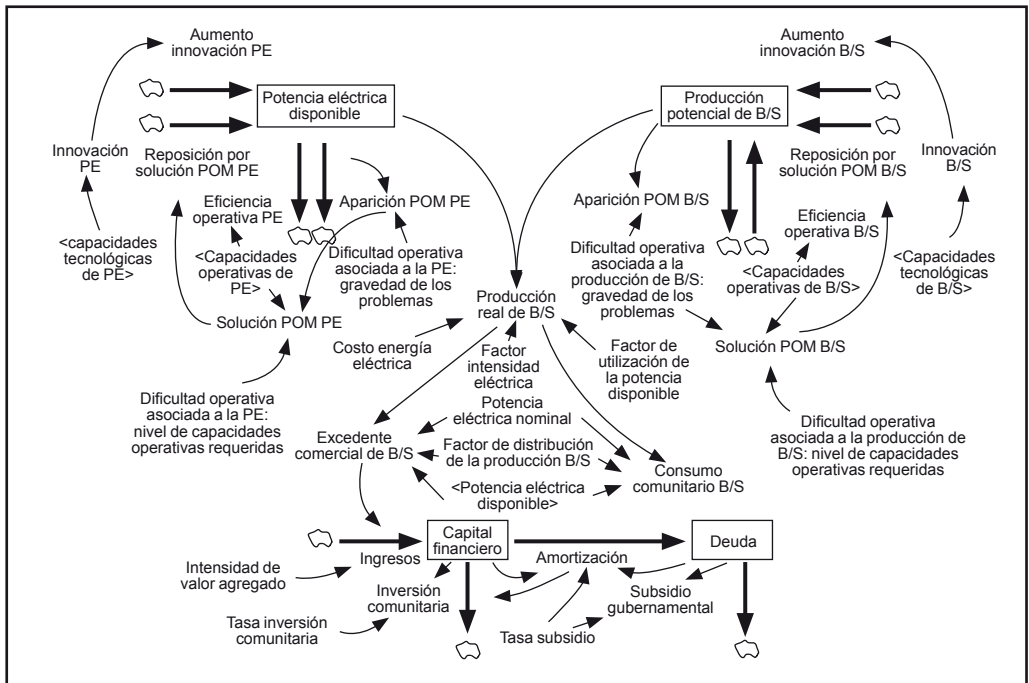
Disminuye como resultado de la inversión comunitaria, cuya magnitud está determinada por el nivel de capital financiero acumulado (a mayor capital financiero, mayor inversión comunitaria), por la tasa de inversión comunitaria (% del capital financiero existen-

te que se destina a inversión comunitaria) y por el nivel de la amortización de la deuda (a mayor amortización de la deuda, menor inversión comunitaria).

Por otra parte, el nivel de la deuda está definido por la acción conjunta de: (a) la amortización, que depende de la tasa de subsidio gubernamental y de los niveles de capital financiero y deuda (a mayores niveles de capital financiero y deuda, mayor amortización; a mayor tasa de subsidio, menor amortización de la deuda por parte de la comunidad), y (b) el subsidio gubernamental (que depende del nivel de la deuda y de la tasa de subsidio gubernamental).

Gráfico 7

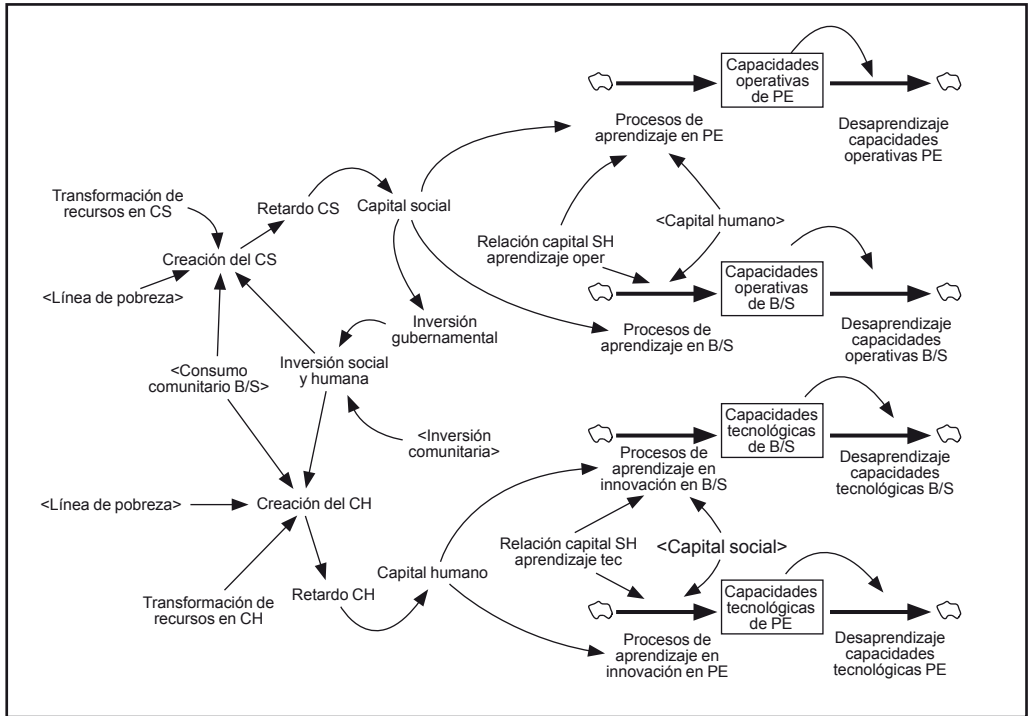
Diagrama de flujos y niveles para la producción de energía y B/S



Fuente: elaboración propia.

Gráfico 8

Diagrama de flujos y niveles para las capacidades



Fuente: elaboración propia.

La simulación de cada uno de los tres escenarios se corre para una comunidad hipotética construida con base en la información presentada en el Cuadro 3. Las ecuaciones matemáticas que definen el modelo de simulación se presentan en el Cuadro 4, empleando la nomenclatura utilizada por el programa

de simulación VENSIM®. Para complementar, los autores ponen el modelo completo en VENSIM®, a disposición de quienes deseen profundizar en su estudio. En el Gráfico 10 se presenta la evolución de las principales variables del modelo para los tres escenarios de simulación.

Cuadro 3

Parámetros del modelo y valores de la inversión gubernamental para la simulación de los tres escenarios

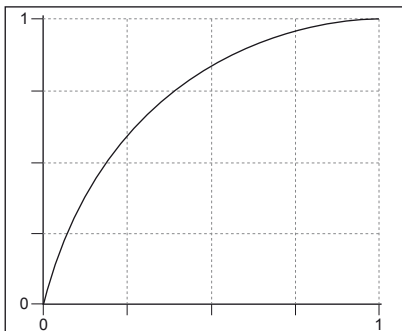
Parámetros y valores iniciales comunes para la simulación	
Número indicativo de habitantes	150 personas, 30 hogares
Potencia eléctrica instalada	50 KW
Capital financiero inicial asociado a la tecnología eléctrica (\$)	0
Inversión inicial en capital físico asociado a la tecnología eléctrica (\$)	420.000.000
Financiamiento de la inversión inicial	120 meses, sin interés
Subsidio gubernamental a la inversión inicial en capital físico	50% de las cuotas de amortización
Intensidad de valor agregado de la producción de B/S	25% del costo total
Costo de la energía eléctrica (\$)	150/KWh
Factor de intensidad eléctrica	4
Factor de utilización de la potencia eléctrica disponible	0,6
Inversión gubernamental por escenario de simulación	
Escenario problema (\$)	300.000 diarios
Escenario de aprendizaje operativo (\$)	870.000 diarios
Escenario de aprendizaje tecnológico (\$)	1.000.000 diarios

Fuente: elaboración propia.

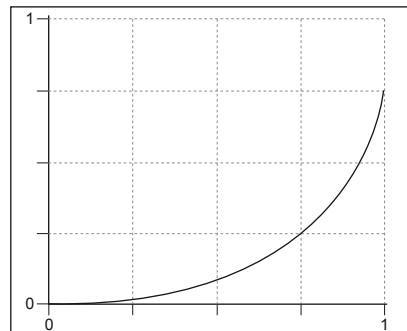
Cuadro 4

Ecuaciones que definen el modelo básico para la simulación

Potencia eléctrica disponible = INTEG [reposición por solución POM PE – Aparición POM PE + Eficiencia operativa PE – DELAY1I (Eficiencia operativa PE, 1, 0) + aumento innovación PE] Valor inicial: 0.85 × Potencia eléctrica nominal



Dificultad operativa asociada a la PE/a la producción de B/: gravedad de los problemas

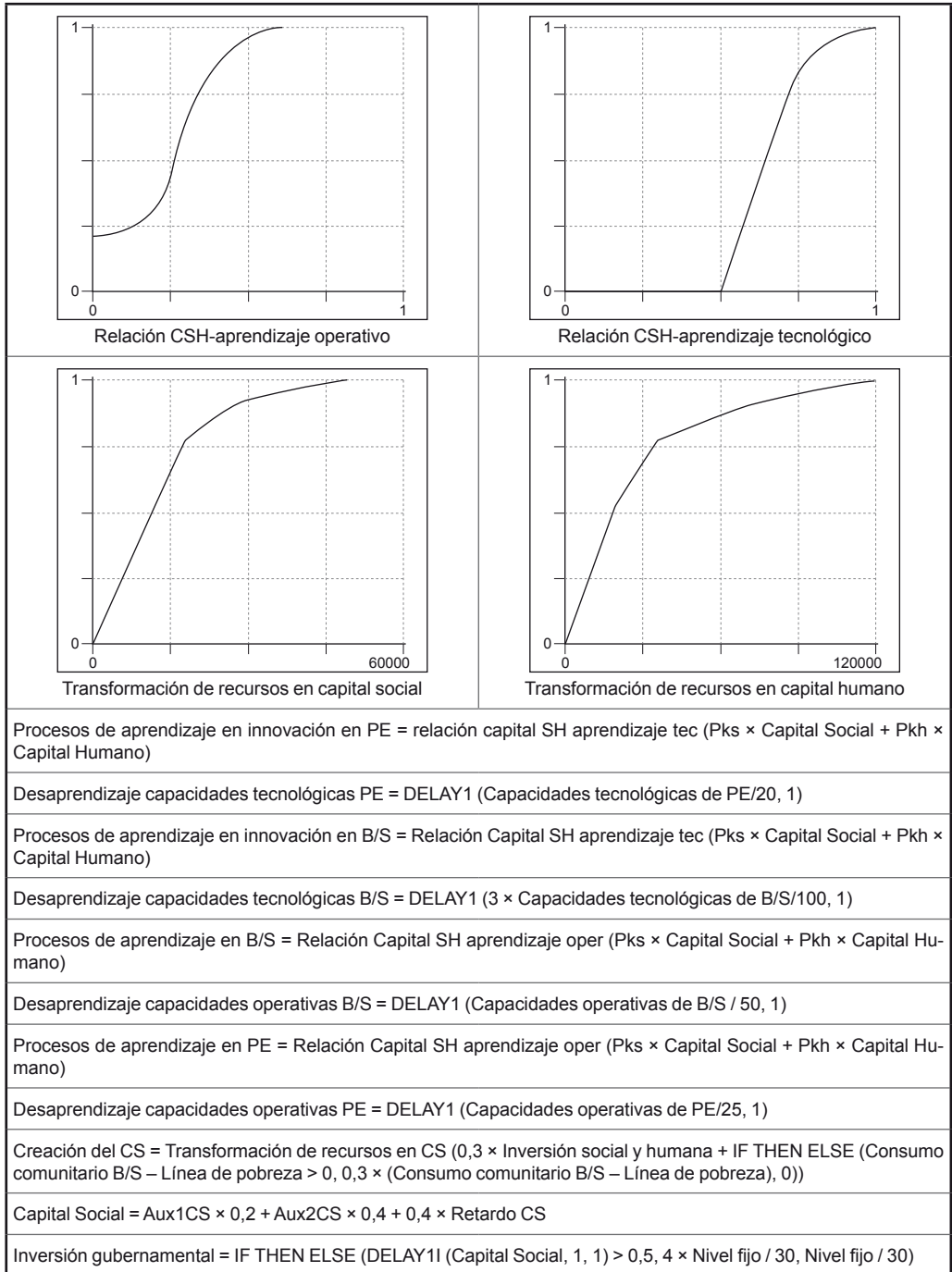


Dificultad operativa asociada a la PE/a la producción de B/S: nivel de capacidades operativas requeridas

Continúa

Aparición POM PE = IF THEN ELSE [Potencia eléctrica disponible – Dificultad operativa asociada a la PE: gravedad de los problemas (RANDOM UNIFORM (0, 1, 1)) × Potencia eléctrica disponible > 0: AND: Time > 1: AND: MÓDULO (Time, 30) = 0, Dificultad operativa asociada a la PE: gravedad de los problemas (RANDOM UNIFORM (0, 1, 1)) × Potencia eléctrica disponible, 0]
Solución POM PE = DELAY1 [IF THEN ELSE (Capacidades operativas de PE > Dificultad operativa asociada a la PE: nivel de capacidades operativas requeridas (RANDOM UNIFORM (0, 1, 2)) × 25: AND: Aparición POM PE > 0, Aparición POM PE, 0), 1]
Producción potencial de B/S = INTEG [Reposición por solución POM B/S + Eficiencia operativa B/S – DELAY1I (Eficiencia operativa B/S, 1, 0) – Aparición POM B/S + Aumento innovación B/S) Valor inicial: (1+Intensidad de valor agregado) × 42,5 × Horas / día × Factor de utilización de la potencia disponible × Costo energía eléctrica / Factor Intensidad eléctrica]
Aparición POM B/S = IF THEN ELSE [Time>1: AND: Producción potencial de B/S – Dificultad operativa asociada a la producción de B/S: gravedad de los problemas (RANDOM UNIFORM (0, 1, 1)) × Producción potencial de B/S * IF THEN ELSE (MÓDULO (Time, 30) = 0, 1, 0)>0, Dificultad operativa asociada a la producción de B/S: gravedad de los problemas]
Solución POM B/S = IF THEN ELSE [Capacidades operativas de B/S > Dificultad operativa asociada a la producción de B/S: nivel de capacidades operativas requeridas (Aleatorio) × 50, DELAY1 (Aparición POM B/S, 2), 0]
Capital financiero = INTEG (Ingresos – Amortización – Inversión comunitaria) Valor inicial: Capital financiero inicial
Deuda = INTEG (-Amortización – Subsidio gubernamental) Valor inicial: Inversión inicial
Inversión comunitaria = IF THEN ELSE [Capital financiero – Amortización > 0, Tasa inversión comunitaria (Capital financiero) × Capital financiero, 0] × IF THEN ELSE (Time > 1: AND: MÓDULO (Time, 30) = 0, 1, 0]
Producción real de B/S = MIN [Horas / día × Potencia eléctrica disponible × Factor de utilización de la potencia disponible × Costo energía eléctrica / Factor Intensidad eléctrica, Producción potencial de B/S)
Excedente comercial de B/S = Producción real de B/S × Factor de distribución de la producción B/S (Potencia eléctrica disponible / Potencia eléctrica nominal)
Consumo comunitario B/S = Producción real de B/S × (1 – Factor de distribución de la producción B/S (Potencia eléctrica disponible / Potencia eléctrica nominal))
Capacidades operativas de PE = INTEG (Procesos de aprendizaje en PE - Desaprendizaje capacidades operativas PE) Valor inicial: 0,1 × 25
Capacidades operativas de B/S = INTEG (Procesos de aprendizaje en B/S – Desaprendizaje capacidades operativas B/S) Valor inicial: 0,6 × 50
Capacidades tecnológicas de B/S = Procesos de aprendizaje en innovación en B/S – Desaprendizaje capacidades tecnológicas B/S Valor inicial: 0,3 × 33
Capacidades tecnológicas de PE = procesos de aprendizaje en innovación en PE – Desaprendizaje capacidades tecnológicas PE Valor inicial: 0,1 × 16,2

Continúa



Continúa

Creación del CH = Transformación de recursos en CH ($0,7 \times$ Inversión social y humana + IF THEN ELSE (Consumo comunitario B/S – Línea de pobreza) > 0 , $0,7 \times$ (Consumo comunitario B/S – Línea de pobreza), 0))
Capital Humano = $Aux1CH \times 0,2 + Aux2CH \times 0,4 + 0,4 \times$ Retardo CH
Inversión social y humana = Inversión comunitaria + Inversión gubernamental
Línea de pobreza = 375.000 (150 personas \times 1 dólar \times 2.500 pesos / dólar)

Fuente: elaboración propia.

El tiempo de simulación es de cinco años, lapso suficiente para que se desarrolle completamente la fase de introducción de una tecnología energética en el microsistema de innovación considerado. Durante este tiempo se considera que las variaciones de población no son significativas (al suponer índices de natalidad y mortalidad normales y ausencia de fenómenos extraordinarios de emigración o inmigración). Tampoco se consideran significativos otros efectos sobre la comunidad causados por factores políticos, económicos y sociales que no estén asociados directamente a la introducción de las tecnologías energéticas y productivas.

7.1 Escenario problema

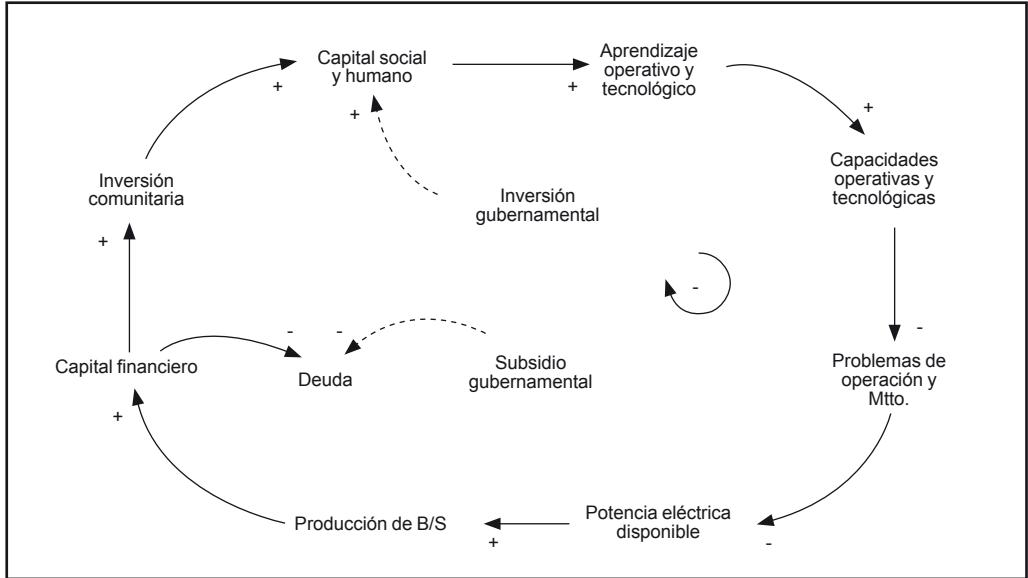
El escenario problema se configura cuando las capacidades operativas y tecnológicas de las organizaciones no son suficientes para asegurar la disponibilidad adecuada de potencia eléctrica y su transformación eficiente en B/S (línea continua en los gráficos del Gráfico 9). En tal caso, la potencia eléctrica disponible comienza un proceso de degradación desde el momento en que la tecnología energética es puesta en operación, por causa de los problemas de operación y mantenimiento que surgen y no son debidamente solucionados.

Como consecuencia, la producción de B/S no puede desarrollarse para alcanzar los niveles planificados, con efectos adversos sobre la inversión social y humana y los niveles de los respectivos capitales. A su vez, los niveles insuficientes de capitales social y humano inhiben los procesos de aprendizaje organizacional e impiden la acumulación de capacidades operativas y tecnológicas, lo que cierra un círculo vicioso que mantiene a la comunidad sumida en el subdesarrollo (Gráfico 9).

En este escenario, los capitales social y humano mantienen un valor bajo, característico de comunidades rurales aisladas que no han sido beneficiarias de adecuada y sostenida inversión gubernamental. En relación con las iniciativas de energización rural, el gobierno central normalmente participa mediante la provisión de subsidios a la inversión inicial, tanto en forma de aportes en especie como de recursos financieros directos. Sin embargo, este subsidio gubernamental sólo contribuye a aliviar la carga financiera de la comunidad sin que el problema de fondo sea resuelto, por cuanto sin potencia eléctrica no hay producción de B/S y, por lo tanto, de excedentes financieros para invertir en los capitales social y humano.

Gráfico 9

Escenario problema: bajos niveles de capitales social y humano debidos a insuficiente inversión inhiben el aprendizaje*



* Esto impide a las organizaciones productivas acumular las capacidades requeridas para resolver los problemas de operación y mantenimiento, que terminan por detener la producción de energía y de B/S y por anular las posibilidades de producir recursos financieros para pagar las inversiones en capital físico y generar inversión comunitaria que apalanque la inversión gubernamental en capitales social y humano.

Fuente: elaboración propia.

7.2 Escenario de aprendizaje operativo

Este escenario se desarrolla cuando una inversión gubernamental y comunitaria adecuada y sostenida da lugar a niveles significativos de los capitales social y humano, los cuales posibilitan la acumulación de capacidades operativas suficientes para asegurar la operación de las tecnologías energéticas y productivas, de manera que su desempeño alcance, con el tiempo, los parámetros de referencia establecidos por los proveedores de las tecnologías (línea de puntos en los gráficos del Gráfico 10).

Se entiende, sin embargo, que los niveles de capitales social y humano no son todavía suficientes para dar el salto a la acumulación significativa de capacidades tecnológicas. Dependiendo de la dificultad operativa de las tecnologías y de las capacidades operativas acumuladas, el período de puesta a punto de los procesos productivos y comerciales conlleva una mayor o menor caída de la producción por períodos más o menos extendidos, durante los cuales es crítico mantener los procesos productivos en marcha.

En este escenario, la producción sostenida de B/S se orienta, prioritariamente, a satisfacer

las necesidades básicas de la comunidad. Los excedentes son utilizados comercialmente para contribuir a pagar la deuda generada por la inversión inicial y, eventualmente, cuando los niveles de capital financiero sean suficientes, para contribuir a la formación de capitales social y humano. Sin embargo, esto último parece requerir niveles de capital físico para producción de energía y de B/S mucho más elevados y una dinámica productiva y tecnológica superior; para los niveles establecidos durante la simulación, el capital financiero oscila alrededor de cero, a causa de la destinación de los ingresos por comercialización de excedentes al pago de la deuda, lo que imposibilita la inversión comunitaria. En tales condiciones, un mayor subsidio gubernamental sólo contribuye a

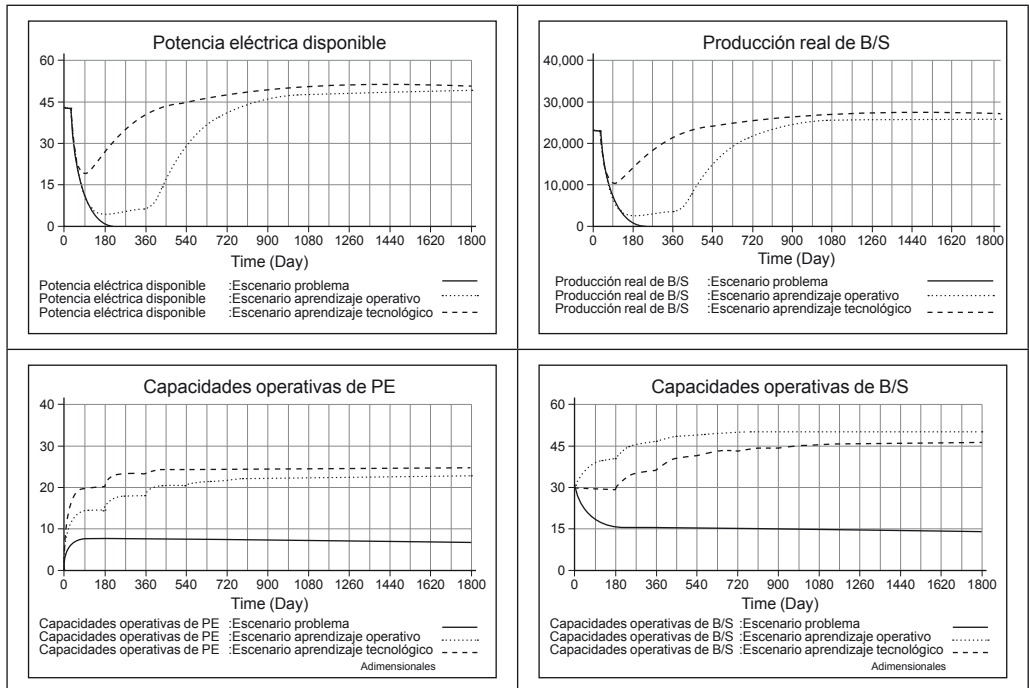
disminuir más rápidamente la deuda durante el tiempo de simulación.

7.3 Escenario de aprendizaje tecnológico

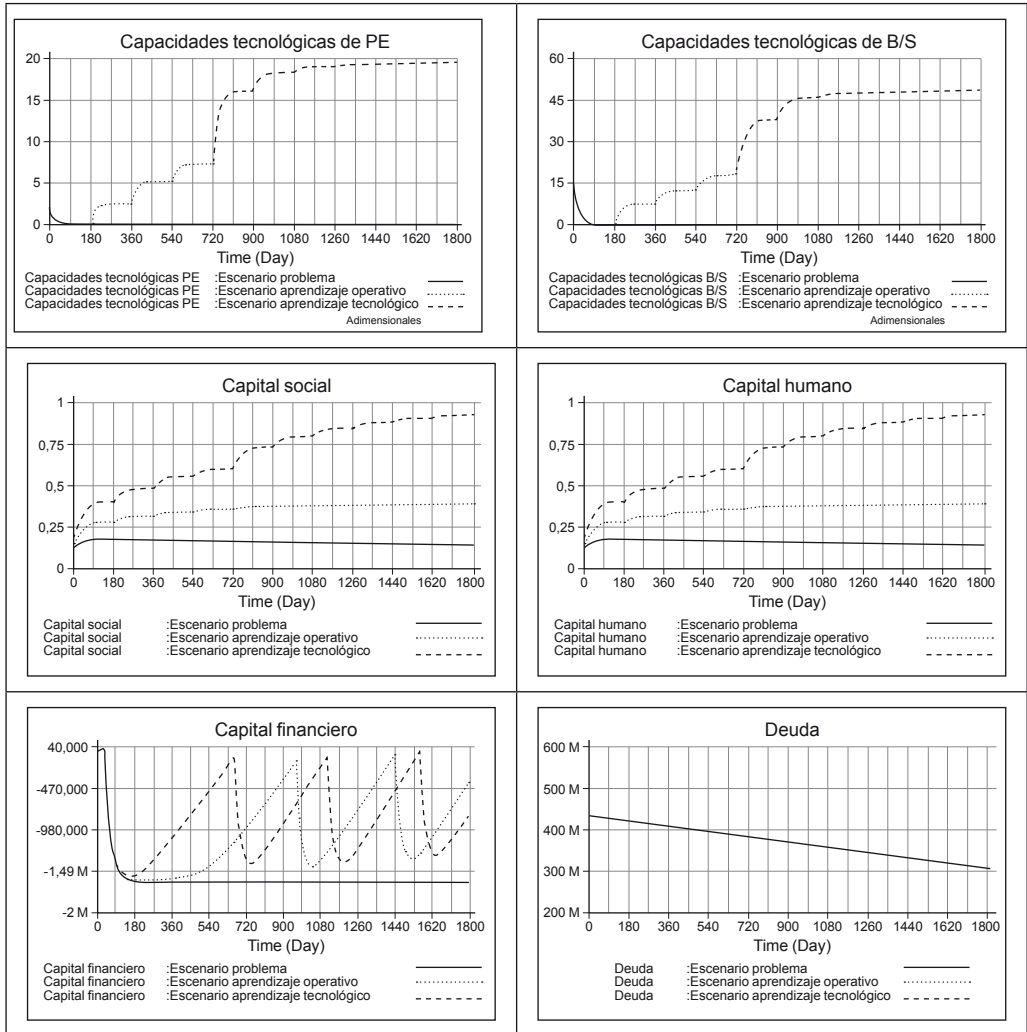
Este escenario presupone una acumulación significativa de capacidades operativas y tecnológicas, lo cual acelera el proceso de puesta a punto de los procesos productivos y comerciales y asegura el logro de niveles superiores de producción (línea de guiones en los gráficos del Gráfico 10). Como componente de las capacidades tecnológicas, las capacidades de innovación son de difícil y lenta maduración y requieren procesos de aprendizaje tecnológico relativamente prolongados.

Gráfico 10

Evolución de las principales variables del modelo para los tres escenarios de simulación



Continúa



Fuente: elaboración propia.

Su efecto pleno se manifiesta en la forma de índices superiores de producción, relativos a los logrados en el escenario de aprendizaje operativo. Sin embargo, quizás su principal potencial estriba en las posibilidades de expansión futura de la producción (tanto de energía como de B/S), a partir de los mayores niveles de capitales social y humano, logrados por una inversión gubernamental

superior frente a la del escenario de aprendizaje operativo.

No obstante, tampoco en este escenario se logra una acumulación satisfactoria de capital financiero, posiblemente por la misma razón aducida arriba en relación con la insuficiente acumulación de capital físico y la mínima producción de energía y de B/S. El único

efecto aparente es una leve aceleración posible del pago de la deuda que, sin embargo, no logra ejercer un efecto significativo sobre la deuda, debido a su magnitud, al menos durante el período de simulación.

Conclusiones y trabajo futuro

Aunque la noción de sistema de innovación se ha venido explorando teóricamente y aplicando de manera extensa desde finales de los años ochenta, la simulación de los sistemas y procesos de innovación es un tema que todavía está por desarrollar. En el presente trabajo se ha abordado el tema desde el enfoque de la dinámica de sistemas, cuyo fin es aportar al desarrollo de un modelo de simulación de un microsistema de innovación. Como aplicación del modelo, se seleccionó la introducción de tecnologías de generación de electricidad en una comunidad rural aislada de un país en desarrollo; por ello el análisis específico se centró en el papel del gobierno en el proceso de innovación.

El trabajo contribuye a evidenciar el potencial de los modelos de simulación de sistemas de innovación bajo el enfoque de la dinámica de sistemas, como una metodología científica que permite integrar distintas perspectivas teóricas complementarias para explorar los elementos y relaciones básicas que gobiernan la evolución del sistema.

Es obvio que el trabajo de construcción del modelo de simulación para el caso abordado apenas comienza. Sin embargo, los resultados obtenidos señalan que la integración de conceptos y proposiciones del marco de los medios de vida sostenibles, por una parte, y

de la perspectiva de los recursos y capacidades en el marco de la gestión tecnológica, por la otra, es una vía rica en posibilidades de exploración teórica en torno a los sistemas de innovación en los que se involucra el desarrollo de pequeñas comunidades rurales.

Mejor que posibilidades de pronóstico, el modelo de simulación construido revela interesantes posibilidades de análisis de escenarios. La fortaleza del método estriba en la posibilidad de integrar, de manera relativamente simple y en un solo modelo dinámico, conceptos y relaciones conocidas, para generar simultáneamente la posibilidad de entender las causas estructurales del comportamiento del sistema.

En principio, los escenarios de simulación explorados en el trabajo son aquellos conformados por la dinámica entre capacidades organizacionales y desempeño tecnológico, dinámica ampliamente estudiada en la literatura de la gestión tecnológica: (a) el escenario problema, en el que las capacidades son, en definitiva, insuficientes; (b) el escenario de aprendizaje operativo, en el que las tecnologías se sostienen con base en capacidades mínimas de operación y mantenimiento, y (c) el escenario de aprendizaje tecnológico, en el que los procesos de aprendizaje aseguran la acumulación de capacidades superiores, los cuales posibilitan el mejoramiento continuo y la innovación de las tecnologías.

El modelo de simulación propone un vínculo básico entre los capitales social y humano de la comunidad y las capacidades tecnológicas y de operación de las organizaciones productivas, vínculo mediado en el modelo por los

procesos de aprendizaje. Este vínculo es crítico para establecer una relación teórica sólida entre el marco de los medios de vida sostenibles y los conceptos centrales de la perspectiva de los recursos y capacidades. Con base en el modelo se podrían sugerir algunas hipótesis que se deben investigar empíricamente, como parte del trabajo futuro.

Por otra parte, aunque las posibilidades analíticas del modelo son mucho más amplias, el trabajo aquí reportado se enfoca en el análisis del papel del gobierno a través de las variables *subsidio gubernamental* (a la introducción de tecnologías de generación de energía eléctrica) e *inversión gubernamental* (en capitales social y humano). En la simulación seleccionada para efectos ilustrativos, el subsidio gubernamental se mantuvo constante entre escenarios; solamente varió la inversión gubernamental.

Es claro que hay otras variables y parámetros del modelo que pueden modificarse entre escenarios de simulación en trabajos futuros. Por lo pronto, los resultados del ejercicio revelan un efecto significativo del papel de la inversión gubernamental en los capitales social y humano. Estos cambios, al tiempo que permanecen las demás condiciones iniciales y parámetros del modelo iguales, son suficientes para producir comportamientos del sistema significativamente diferentes, en términos de la capacidad de la comunidad para garantizar la introducción exitosa de la tecnología.

Para trabajos futuros quedan, además de las mejoras que se pueden introducir al modelo, la exploración sistemática de posibilidades de análisis mediante la simulación de va-

rios escenarios, haciendo consideraciones diversas sobre la inversión en capital físico, el subsidio gubernamental, las dinámicas y parámetros que definen la transformación de los capitales social y humano en capacidades operativas y tecnológicas y las distintas posibilidades de producción de B/S y de capital financiero, a partir del uso productivo de la energía eléctrica generada, entre otras posibles relaciones de interés.

Los resultados del análisis hecho sugieren que en comunidades de bajos capitales social y humano iniciales, una inversión gubernamental adecuada y sostenida que eleve significativamente estos capitales es esencial para inducir procesos de desarrollo con base en la generación de electricidad y la producción de B/S. La sola subvención gubernamental de las inversiones iniciales asociadas al capital físico parece ser insuficiente.

Por otro lado, la simulación conduce a pensar que se requerirían niveles relativamente altos de capital físico para garantizar excedentes de producción comercial que lleven a aumentos significativos de los capitales social y humano. Estos resultados sugieren que las comunidades tendrían que acumular ciertos niveles críticos de capitales físico, social y humano, por debajo de los cuales no se pueden inducir procesos autosostenidos de desarrollo integral comunitario.

En suma, el modelo de dinámica de sistemas construido revela ser una propuesta interesante para el estudio de fenómenos semejantes al considerado en este trabajo, que abre posibilidades de análisis de escenarios de simulación que integran conceptos y

proposiciones teóricas básicas en visiones coherentes, a partir de las cuales se podrían identificar las dinámicas del sistema para su investigación posterior.

Como es natural, el modelo propuesto es susceptible de mejoras y ajustes. Hasta el momento, su construcción responde a una visión determinística racional, que podría ser cambiada después por una aproximación más adaptativa, que responda a un comportamiento más real de los agentes del sistema y que expanda aún más las posibilidades del modelo de simulación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias y a GUÍO Español por la cofinanciación otorgada al proyecto *Plataforma para el soporte a la evaluación de políticas y a la toma de decisiones en energización de zonas no interconectadas en Colombia*. Igualmente, a los demás integrantes del equipo del proyecto, particularmente a los profesores de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, José Javier Aguilar (Escuela Ingeniería de la Organización), Isaac Dyer y Gloria Patricia Jaramillo (Instituto de Ciencias de la Decisión), y a Judith Cherni, del Imperial College, Londres, por sus sugestivos comentarios y su invaluable contribución a abrir los espacios de discusión donde se fraguaron muchas de las ideas aquí presentadas. Finalmente, esta nota de agradecimiento no quedaría completa sin reconocer el valioso aporte de dos evaluadores anónimos de la revista *Cuadernos de Administración*, que fue clave para mejorar la coherencia, la rigurosidad y la claridad del artículo.

Lista de referencias

- Arrow, K. (1962). The economic implications of learning by doing. *Review of Economic Studies*, 29, 166-170.
- Axelrod, R. (1997). Advancing the art of simulation in the social sciences. In: R. Conte, R. Hegselmann and P. Terna (Eds.), *Simulating social phenomena* (pp. 21-40). Berlin: Springer.
- Barney, J. B. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17, 99-120.
- Bell, M. (1984). Learning and the accumulation of industrial technological capacity in developing countries. In: M. Fransman and K. King (Eds.), *Technological capability in the third world* (pp. 187-209). London: Macmillan.
- Cohen, W. M. and Levinthal, D. A. (1989). Innovation and learning: two faces of R&D. *Economic Journal*, 99, 569-596.
- Conte, R., Hegselmann, R. and Terna, P. (Eds.), (1977). *Simulating social phenomena*. Berlin: Springer.
- Council on Competitiveness (2004). *Innovate America-National Innovation Initiative Report: Thriving a world of challenge and change*. Washington: autor.
- Department for International Development (DFID), (2002). *Issues energy for the poor*. London: autor.
- (2003). *Hojas orientadoras sobre los medios de vida sostenible. Sección 2: marco*. Recuperado

- en marzo de 2005, de http://www.livelihoods.org/info/guidance_sheets_rtf/SP-GS2.rtf.
- Dodgson, M. (1991a). Technology learning, technology strategy and competitive pressures. *British Journal of Management*, 2, 133-149.
- (1991b). *Technological collaboration and organisational learning: A preliminary review of some key issues*. DRC Discussion Paper No. 85, Science Policy Research Unit. Brighton: University of Sussex.
- Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R. R., Silverberg, G. and Soete, L. L. G. (Eds.), (1988). *Technical change and economic theory*. London: Pinter Publisher.
- Forcano, R. (2003). *Removal of barriers to the use of renewable energy sources for rural electrification in Chile*. Disertación de Maestría en Política Científica y Tecnológica no publicada, Massachusetts Institute of Technology, Boston, Estados Unidos.
- Fransman, M. and King, K. (Eds.), (1984). *Technological capability in the third world*. London: Macmillan.
- Freeman, C. (1987). *Technology policy and economic performance: Lessons from Japan*. London: Pinter Publishers.
- (1995). The 'National System of Innovation' in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics*, 19, 5-24.
- and Pérez, C. (1988). Structural crisis of adjustment, business cycles and investment behaviour. In: G. Dosi et al. (Ed.), *Technical change and economic theory* (pp. 38-66). London: Pinter Publisher.
- Global Network on Energy for Sustainable Development (GNESD) (2007). *Renewable energy technologies and poverty alleviation: Overcoming barriers and unlocking potentials*. Roskilde: autor.
- Grant, R. (1991). The resource-based theory of competitive advantage: Implications for strategy formulation. *California Management Review*, Spring, 114-135.
- Howitzvej, F. (2000). *Absorptive capabilities in industrial districts: The role of knowledge creation and learning and boundary spanning mechanisms*. Frederiksberg: Copenhagen Business School. Department for Industrial Economics and Strategy.
- Karekezi, S. (1995). *Renewable energy technologies as an option for a low-carbon energy future for developing countries: Case examples from Eastern and Southern Africa*. Nairobi: African Energy Policy Research Network (AFREPREN)-Foundation for Woodstove Dissemination (FWD). Recuperado el 16 de mayo de 2005, de <http://unepriaoe.org/Copenhagen-Conf/karekezi.htm>.
- Lundvall, B-Å. (1985). *Product innovation and user-producer interaction*. Aalborg: Aalborg University Press.
- (1988). Innovation as interactive process: From user producer interaction to the national systems of innovation. In: G. Dosi et al. (Ed.), *Technical change and economic theory* (pp. 349-369). London: Pinter Publishers.

- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), (2005). *Oslo manual: Guidelines for collecting and interpreting innovation data* (3rd ed.). Paris: OECD-Eurostat.
- Pitt, J. C. (2000). *Thinking about technology: Foundations of the philosophy of technology*. New York: Seven Bridges Press.
- Prasad, J. and Villa, J. (2002). *Implementation of renewable energy technologies: Opportunities and barriers*. Rolkilde: UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment-Risø National Laboratory.
- Rangone, A. (1999). A resource-based approach to strategy analysis in small-medium sized enterprises. *Small Business Economics*, 12, 233-248.
- Robb, R. W. (2002). *Lessons learned about sustainable rural energy services using renewable energy*. Community Power Corporation. Recuperado el 25 de abril de 2005, de <http://www.gocpc.com>. Fecha de consulta: 25 abril de 2005.
- Rosenberg, N. (1982a). Learning by using. In: N. Rosenberg (Ed.), *Inside the black box: Technology and economics* (pp. 120-140). Cambridge: Cambridge University Press.
- (1982b). *Inside the black box: Technology and economics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sharif, N. (2006). Emergence and development of the national innovation systems concept. *Research Policy*, 35, 745-766.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modelling for a complex world*. New York: McGraw-Hill.
- Sudhakara, B. and Balachandra, P. (2004). Dynamics of technology shifts in the household sector: implications for clean development mechanism. *Energy policy*. En prensa.
- Teece, D. and Pisano, G. (1994). The dynamic capability of firms: An introduction. *Industrial and Corporate Change*, 3 (3), 537-556.
- Teece, D., Pisano, G. and Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18 (7), 509-533.
- United Nations Development Programme (UNDP), (2000). *Rural energy development programme*. Government of Nepal. Recuperado el 16 de mayo de 2005, de <http://www.redp.org.np/phase3/>
- (2002). *Human development report*. Recuperado el 16 de mayo de 2005, de <http://hdr.undp.org/reports/global/2002/en/>
- Weingart, J. (2003). Multi-function platforms: Enhancing economic productivity of rural communities. *Tech Monitor*, Nov-Dec, 35-41.
- Winter, S. G. (2000). The satisficing principle in capability learning. *Strategic Management Journal*, 21, 981-996.
- Wernerfelt, B. (1984). A resource-based view of the firm. *Strategic Management Journal*, 5, 171-180.

