

## ESTADO DEL ARTE Y UNA PROPUESTA INTEGRADORA PARA EL ESTUDIO DE LA BRECHA ENERGÉTICA EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA COGENERACIÓN EN EL SECTOR INDUSTRIAL.

### STATE OF THE ART AND AN INTEGRATED PROPOSAL TO ASSESS THE ENERGY GAP IN THE IMPLEMENTATION OF COGENERATION IN INDUSTRIAL SECTOR.

Ana Cecilia Escudero A.<sup>1</sup> & Sergio Botero B.<sup>2</sup>

1. Instituto de Energía y Termodinámica. Universidad Pontificia Bolivariana

2. Escuela Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín  
ana.escudero@upb.edu.co; sbotero@unal.edu.co

*Recibido para evaluación: 23 de Octubre de 2009  
Aceptación: 25 de Noviembre de 2009  
Entrega de versión final: 11 de Diciembre de 2009*

#### Resumen

En este artículo se presenta el estado del arte de teorías y metodologías de toma de decisión difundidas en la literatura y que abordan temas vinculados con la implementación de sistemas de cogeneración, como son la eficiencia energética y la adopción de nuevas tecnologías y se analiza como éstas han tratado de explicar un fenómeno tan complejo como la Brecha Energética (i.e. poca implementación de proyectos de eficiencia energética que son técnica y económicamente viables) clasificándolas en cuatro aproximaciones metodológicas. Con base en el análisis de estas aproximaciones se plantea una propuesta conceptual que ubica al ente decisor como principal objeto de estudio y al proceso real (no ideal) de toma de decisión como un mecanismo que facilita la identificación y posterior comprensión del fenómeno desde los principios de la racionalidad limitada.

**Palabras Clave:** Análisis de decisiones, Racionalidad Limitada, Cogeneración, Generación Distribuida, Eficiencia Energética.

#### Abstract

This paper shows the state of the art of decision making methodologies and theories that are in the literature and address topics related to the implementation of cogeneration systems. These topics are energy efficiency, new technologies adoption. These are analyzed in how they try to explain a complex phenomenon such as the energy gap (low implementation of technically and economically feasible energy efficiency projects), and classifying them in four methodological approaches. Based on the analysis of these approaches, a conceptual proposal is proposed, setting the decision maker as the central object of study, and the real (not the ideal) decision making process as a mechanism that facilitates the identification and understanding of the phenomenon from the bounded rationality principles.

**Keywords:** Decision Analysis, Bounded Rationality, Cogeneration, Distributed generation, Energy Efficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe un movimiento fuerte que intenta demostrar las ineficiencias de los sistemas de generación de energía eléctrica centralizados y propone que un esquema descentralizado puede representar ventajas técnicas y económicas interesantes. Estos sistemas son comúnmente conocidos como Generación Distribuida y entre sus tecnologías de aplicación se destaca la Cogeneración definida como la generación de energía eléctrica y aprovechamiento de energía térmica residual en un mismo sistema. En años recientes, algunos desarrolladores de proyectos han encontrado en el sector industrial un nicho de mercado interesante para la cogeneración. Dependiendo de la situación específica, se pueden obtener ahorros de energía considerables con tiempos de retorno de la inversión aceptables. Algunos usuarios industriales se han beneficiado de estos sistemas durante muchos años, pero también este ahorro potencial puede beneficiar a otros agentes (e.g. proveedores de equipos, empresas de ingeniería, inversionistas, entre otros). Pepermans et al., (2008) plantean que para el caso de los mercados liberalizados de energía, son atractivos los sistemas flexibles o que permitan adaptarse a los requerimientos de cada usuario, como es el caso de la cogeneración. Adicionalmente para los clientes que requieran altos estándares de confiabilidad en el suministro de energía puede resultar atractivo invertir en un sistema que les permita alcanzar estos niveles de confiabilidad. La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) plantea que el suministro confiable de energía es el más importante nicho de mercado para este tipo de sistemas (Ackermann, 2004). Los aspectos ambientales también son una fuerza motora para el uso de sistemas de cogeneración o para la autogeneración con biomasa. Siddiqui et al, (2003) plantean que el potencial para aplicar las tecnologías de cogeneración a pequeña escala, tanto renovables como térmicas mejorarán considerablemente y van a favorecer la generación cercana a la demanda. Simultáneamente, la electrónica de potencia permitirá la operación de sistemas semi-autónomos puesto que el deseo de los clientes por controlar la calidad de la potencia se intensificará. Es importante anotar que la autoproducción de energía puede traer efectos negativos, como es el caso de una posible saturación en las redes de transporte de gas natural o la introducción de costos adicionales asociados a la conexión e integración del sistema con la red. Sin

embargo el beneficio económico macro de la implementación puede ser significativamente mayor (Ackermann, 2004).

Aunque a nivel mundial se ha demostrado la existencia de un potencial de eficiencia energética y económica así como los beneficios ambientales de la cogeneración, en países como Estados Unidos (Resource Dynamics Corporation - CSGI, 2001), Inglaterra (Strachan, Dowlatabadi, 1999), Japón (Bonilla, Akisawa, Kashiwagi, 2003), Suiza (Madlener, Wickart, 2004) e inclusive Colombia (UPME, 1997), algunos autores manifiestan que las tasas de implementación son aún bajas (Mueller, 2006)-(Russel, 2006)-( Bullock, Weingarden, 2006) y se estima que las compañías industriales exigen tasas de retorno de 35% a 50% debido a que ven la generación de energía como una actividad secundaria (Casten, Downes, 2006). Ante este comportamiento, algunas instituciones y Gobiernos a nivel mundial han diseñado estrategias que propenden por la promoción de la cogeneración en los sectores industrial, comercial y residencial pero aún no son del todo efectivas (Ackermann, 2004). El problema de la baja implementación de sistemas de cogeneración es aún tema de estudio y abre la posibilidad a explorar nuevas perspectivas que permitan comprender dicho fenómeno.

## 2. EL FENÓMENO DE LA BRECHA ENERGÉTICA

El fenómeno de la baja implementación de tecnologías energéticamente eficientes y con buen potencial económico no es nuevo y ha sido referenciado por diversos autores. Shama se refiere a este fenómeno como la “Paradoja Energética” (Shama, 1983), Jaffe y Stavins (1994) usan el término “Brecha Energética”. En los diferentes trabajos que han abordado la problemática detrás de la paradoja o brecha energética se identifican diferentes enfoques y aproximaciones. En la Tabla I se presenta un resumen de perspectivas identificadas en la literatura (Sorrell et al, 2000).

Esta clasificación parece bastante acertada y concuerda con lo encontrado en una amplia revisión bibliográfica que se ha llevado a cabo para la realización de este artículo, pero también cabe plantear una forma de clasificar los trabajos referentes a la brecha energética, no desde la perspectiva conceptual sino desde su aproximación metodológica, la cual se presenta a continuación.

**Tabla I.** Perspectivas en el Estudio de Barreras a la Eficiencia Energética

perspectiva	Ejemplos	Actores	Teoría
mica	Información imperfecta, asimétrica. Costos escondidos. Riesgo	Individuos y Organizaciones concebidos como racionales y maximizadores de la utilidad	Economía Neo-clásica
ortamiento	Inhabilidad para procesar información. Forma de la información. Confianza. Inercia	Individuos concebidos como racionalmente limitados, con motivaciones no económicas y una variedad de influencias sociales	Economía de los Costos de transacción. Psicología. Teoría de Decisión
izacional	Falta de poder e influencia administrativa. Cultura organizacional que no tiene en cuenta aspectos energéticos/ ambientales	Organizaciones concebidas como un sistema social influenciado por objetivos. Rutinas. Cultura. Estructuras de poder, etc.	Teoría Organizacional

Fuente: Traducción de Sorrell et al (2000) pg. 12

## 2.1. Aproximación Descriptiva

Esta aproximación consiste principalmente en hacer observaciones sobre casos de estudio y plantear posibles causas del fenómeno, basados en evidencia empírica, para lo cual se usan herramientas como encuestas y entrevistas, se hace una recopilación de revisiones bibliográficas referentes al tema, se analizan algunos de los planteamientos y se proponen posibles soluciones, muchas de estas de carácter regulatorio. La mayoría de los trabajos publicados son descriptivos y se destacan trabajos como el de Shama (1983) quien afirma que la paradoja se ha hecho evidente debido a que los análisis energéticos han estado tradicionalmente dominados por perspectivas de Ingeniería y Economía, dejando de lado una perspectiva de Comportamiento. El autor hace énfasis en la necesidad de un análisis integral desde estas tres perspectivas, más no se presenta una propuesta metodológica para lograrlo. Jaffe y Stavins (1994) argumentan que problemas como fallas y costos de información, costos escondidos, altas tasas de descuento y heterogeneidad de los potenciales adoptantes son claves para entender el fenómeno.

Woodruff y Turner (1998) documentan la experiencia de algunas compañías industriales en Estados Unidos mediante una serie de casos de estudio que reflejan los

aspectos organizacionales y corporativos frente a la implementación de proyectos de eficiencia energética y concluyen que el carácter organizacional de la empresa manufacturera es la que determina su habilidad para gestionar los recursos energéticos.

Howart, Haddad y Paton (2000) exploran la perspectiva de los usuarios de participar en programas de eficiencia energética y plantean que el problema se centra en coordinar gerentes, empleados, proveedores y consumidores para que obtengan un beneficio mutuo. Los resultados del estudio indican que los factores relacionados con la cultura corporativa, estructura y prácticas gerenciales juegan un papel importante en mediar las decisiones para invertir en tecnologías energéticamente eficientes.

Russell (2006) también destaca la importancia de la estructura organizacional de las empresas en la adopción de tecnologías de eficiencia energética con base en algunos estudios de caso y señala cómo estas iniciativas se seleccionan por su potencial para reducir costos, su capacidad de retorno y para contener el riesgo operacional. Algunos factores determinantes para la implementación pueden ser el grado de autoridad de los decisores y su nivel de compromiso, la profundidad del soporte técnico dentro de la compañía y la capacidad que tengan de expresar el desempeño energético como contribución a los objetivos del negocio.

Sorrell et al, (2000) presentan un completo estudio de las barreras a la eficiencia energética mediante casos de estudio en algunos países de Europa. Con el uso de entrevistas con individuos de cada organización y con especialistas del sector, la evidencia documentada del desempeño energético y las oportunidades de eficiencia energética en el contexto específico de cada organización se identificaron posibles barreras y se analizaron desde las tres perspectivas antes mencionadas.

Botero (2002) presenta una categorización de las opciones de negocio de eficiencia energética relevantes para los usuarios industriales en Colombia. El estudio se basa en información suministrada en encuestas y da un orden de importancia de los criterios de decisión, encontrando que los industriales colombianos tienen como prioridad los factores económicos al momento de decidir invertir en eficiencia energética, pero también consideran otros aspectos como la preocupación ambiental, la cultura organizacional y la imagen pública.

Sandberg y Söderström (2003) después de consultar a diversos gerentes de empresas de manufactura sobre su experiencia frente a la eficiencia energética, manifiestan la necesidad de desarrollar herramientas de soporte a la decisión pero no desde una perspectiva técnica sino desde una perspectiva gerencial.

Desde el punto de vista de las decisiones multicriterio, hay una gran cantidad de trabajos que utilizan este enfoque. Neves et al, (2008) proponen un enfoque de toma de decisiones multicriterio para escoger iniciativas de eficiencia energética, este enfoque se basa en el método multicriterio ELECTRE-TRI y permite la consideración de diferentes tipos de impactos, tanto cualitativos como cuantitativos, aunque evitando conversiones de unidades y mediciones que podrían resultar muy complejas. Se identifican los objetivos fundamentales de una agencia energética, dividiéndolos en dos grandes grupos, unos sociales y los otros operacionales.

Wang et al (2009) hacen una revisión de los diferentes métodos multicriterio de análisis de decisiones utilizados para energía sostenible. Los criterios se resumen en cuatro grandes aspectos: Técnicos, económicos, ambientales y sociales. Los métodos de ponderación de criterios son clasificados en tres grupos: subjetivos, objetivos y combinados. Los autores identifican varios métodos basados en: ponderaciones, establecimiento de prioridades, por eliminación, difusos, y combinaciones. Se observa que el costo de inversión ocupa el primer lugar en todos los criterios de evaluación y las emisiones de CO<sub>2</sub> lo siguen de cerca debido a un enfoque cada vez mayor en la protección ambiental. Se encontró que el método más popular de ponderación es el de iguales pesos de criterio, el Proceso de análisis Jerárquico (AHP) es el método comprehensivo más popular, y que los métodos de agregación son útiles para obtener resultados racionales en la toma de decisiones de energía sostenible.

Esta aproximación Descriptiva es la que ha dado cuenta de la existencia de la brecha energética desde una mirada general y basándose en evidencia empírica, lo cual ha dado las pautas para desarrollar trabajos de carácter teórico y aplicado en las otras aproximaciones.

## **2.2. Aproximación Informática**

Otros trabajos, también muy difundidos en la literatura, se han centrado en desarrollar herramientas informáticas de soporte a la toma de decisión diseñadas

para determinar la configuración óptima de tecnología, capacidad, operación del sistema y costos, que le permiten al usuario encontrar una solución adecuada. En esta aproximación Informática se destacan trabajos como el Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), un software que encuentra la combinación de componentes de menor costo que satisface las cargas eléctricas y térmicas de una determinada demanda, tanto para tecnologías convencionales como no convencionales (NREL, 2005). El software Distributed Energy Resources Customer Adoption Model (DER-CAM) permite introducir información de consumos y precios históricos, usualmente de un año, con el fin de determinar curvas de operación detalladas (Siddiqui et al, 2003). Existen muchas otras herramientas de soporte a la decisión bajo los mismos principios, aunque con diferentes niveles de complejidad y con parámetros adecuados a las condiciones particulares de aplicación como el Building Energy Analyzer BEA (Mueller, 2006) y el de la red internacional RETScreen (2007).

Estas herramientas informáticas mencionadas utilizan modelos de optimización que consideran los aspectos técnicos y económicos de un sistema de cogeneración para dar una solución que minimice los costos, pero no garantizan que sea la solución adoptada por el decisor. Esto se ha hecho evidente por ejemplo en un estudio de validación del DER-CAM para pequeñas centrales de generación en sitio (<500 kW) basándose en datos de experiencia reales (Bailey et al, 2003). DER-CAM generalmente encuentra que la opción tecnológica más atractiva es la combinación de motores reciprocantes y la refrigeración por absorción (esto posiblemente debido a que de los cinco usuarios evaluados, cuatro eran edificios, para los cuales el mayor requerimiento energético es aire acondicionado). También tiende a elegir valores de capacidad instalada superiores a los que realmente eligen los diseñadores del proyecto. En un caso notable en el cual DER-CAM elige motores reciprocantes los desarrolladores del proyecto adoptaron celdas de combustible, en gran parte, por motivos que no están incorporadas al modelo (e.g. preferencias del decisor, alternativas de negocio o el suministro gratuito de equipos). En otros de los casos evaluados, la opción seleccionada por DER-CAM de implementar un sistema de cogeneración, va en contravía de la decisión de los usuarios de continuar con el caso base de producción de energía térmica aislada y compra de energía a la red, es decir, una

decisión no óptima de acuerdo con los resultados del modelo. Por razones como esta, es válido afirmar que aunque las herramientas de soporte son de gran ayuda, no determinan el curso de la decisión final.

### **2.3. Aproximación Matemático-Estadística**

En una menor cantidad, algunos trabajos han usado sofisticadas herramientas matemáticas y estadísticas para modelar y hacer proyecciones sobre las tasas de implementación y otros puntos de interés en el tema de la brecha energética.

Un modelo representativo de este tipo es el realizado por Strachan y Dowlatabadi (1999) sobre la adopción de cogeneración con motores a gas en el Reino Unido. El modelo calcula el retorno de inversión de proyectos reales implementados entre los años 1992 y 1997 con el fin de evaluar si las decisiones que se adoptaron en su momento fueron o no óptimas. En el 70% de los casos las decisiones tomadas fueron cuestionables debido a que se subestimaron costos futuros de operación y mantenimiento o se firmaron acuerdos de servicios de energía entre proveedores y adoptantes por valores muy superiores al costo real (este comportamiento evidencia nuevamente la desviación existente entre las soluciones óptimas encontradas por los modelos y las que realmente se toman).

Otros estudios de este tipo son los modelos de implementación de la cogeneración en industrias de manufactura en Japón (Bonilla, Akisawa, Kashiwagi, 2003), Suiza (Madlener, Wickart, 2004) y Estados Unidos (Bullock, Weingarden, 2006); todos ellos presentan en sus análisis evidencia de la existencia de factores relevantes no incluidos en los modelos. Mueller (2006) intenta incluir algunos de estos aspectos en un modelo de adopción de la cogeneración para el estado de Illinois, Estados Unidos, con base en la información recopilada en encuestas y mediante un modelo Logit. El modelo estima una probabilidad de adopción o no, de acuerdo con la percepción de los decisores frente a variables de tipo regulatorio, como son el control ambiental de emisiones, requerimientos técnicos de conexión a la red, costos asociados a la energía de respaldo y reglamentos locales de conexión; la estructura de propiedad de la empresa (pública o privada) y su nivel de conocimiento de la tecnología teniendo como variable de control a la rentabilidad esperada. Los resultados muestran que el potencial de ahorro influye significativamente en la decisión de las

empresas de buscar y evaluar un sistema de cogeneración: a mayor rentabilidad, mayor probabilidad estimada de considerar la evaluación del proyecto (como es de esperarse). Pero una vez se ha confirmado el ahorro potencial, la complejidad regulatoria surge como una preocupación que influye significativamente en el proceso final de implementación: a mayor complejidad regulatoria percibida, menor probabilidad estimada de implementación. También se encontró que la decisión de implementar la cogeneración no depende significativamente de la familiaridad con el tema o el grado de conocimiento de la tecnología, lo cual parece soportar las observaciones de Simon (1979) quien afirma que las empresas toman decisiones en un ambiente de información imperfecta.

Schleich y Gruber (2008) condujeron un análisis econométrico para evaluar la relevancia empírica de varias barreras a la difusión de medidas de eficiencia energética en 19 subsectores de los sectores comerciales y de servicios en Alemania. De igual forma se analizaron diferentes factores para explicar estas barreras, y entre éstos se considera que uno de los más relevantes es el asociado con la racionalidad limitada. Para cada subsector se desarrolló un modelo Logit separado, y los resultados sugieren que las barreras más importantes son el dilema entre inversionista e usuario, y la falta de información sobre patrones de consumo de energía.

### **2.4. Aproximación de racionalidad Limitada**

Observaciones como las de Shama (1983) al hacer referencia a la paradoja energética y afirmar que "...esta constituye un comportamiento "irracional" de parte de los consumidores desde el punto de vista de ingenieros y economistas, quienes esperarían una rápida adopción una vez que los cálculos de ingeniería y económicos sean favorables"; la teoría de racionalidad limitada de Simon (1979) que plantea que los decisores no toman la decisión óptima sino una que los satisface dadas sus limitaciones cognitivas, computacionales, de información y de tiempo así como los trabajos de Khanemann y Tversky (2000) en los cuales se cuestiona la teoría de utilidad esperada subjetiva como descriptora de lo que hace la gente, han motivado esta aproximación a la brecha energética, la cual propende por el modelamiento de los procesos reales de toma de decisión (no herramientas optimizadoras de soporte a la

decisión). Mediante estudios de tipo experimental y que combinan conocimientos de diversas disciplinas, se ha encontrado que cuando un sujeto se enfrenta a un problema de decisión, utiliza Heurísticas (i.e. reglas de decisión) las cuales le permiten encontrar una solución rápida sin necesidad de realizar cálculos complejos (i.e. optimización).

La literatura referente a la introducción de heurísticas en modelos de toma de decisión es poca y en el tema específico de eficiencia energética es aún más escasa. Franco (2002) se basa en la teoría de Simon para explicar la poca penetración de la tecnología de bombillos eficientes y plantea que las suposiciones usualmente asumidas sobre la racionalidad de los decisores en cuanto que optimizan una función de utilidad bajo condiciones de información perfecta, "... es necesario transformarlas por criterios de satisfacción y preferencia, especialmente cuando se busca explicar asuntos como la penetración de tecnologías o la sustitución de fuentes". El trabajo de Franco muestra la validez de esta teoría para entender los comportamientos reales de adopción de tecnologías, analizando las curvas de penetración como resultado de múltiples decisiones individuales dadas sus limitaciones de información, considerando la restricción del dominio y el efecto de los gustos y necesidades particulares, pero no detalla el proceso de toma de decisión como tal.

Wittmann et al, (2006) intentan aplicar los principios de racionalidad limitada para el caso de la adopción de tecnologías de eficiencia energética por parte de usuarios residenciales, centrándose en el proceso de toma de decisión. Aunque el modelo es netamente teórico (los parámetros son supuestos y no se validan con datos reales), ofrece algunos resultados ilustrativos sobre la importancia del comportamiento no optimizador de los decisores y sienta las bases para el desarrollo de modelos de racionalidad limitada aplicables al tema de la brecha energética.

Cada una de las aproximaciones antes mencionadas, cumple un papel relevante en el estudio del fenómeno de la brecha energética. A continuación se presenta una propuesta conceptual para abordar este problema que integre dichas aproximaciones y perspectivas de una manera práctica pero con fundamentación teórica, destacando como eje conductor la aproximación de racionalidad limitada.

### **3. UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ABORDAR EL FENÓMENO DE LA BRECHA ENERGÉTICA EN EL CASO DE COGENERACIÓN EN EL SECTOR INDUSTRIAL**

Para poder usar los conceptos de Simon en la construcción de un modelo de toma de decisión, Gigerenzer y Selten (2001) establecen como principio fundamental que los decisores siguen una serie de reglas, las cuales se pueden definir de acuerdo con la etapa del proceso como: reglas de búsqueda (se refiere a la búsqueda de alternativas así como herramientas de análisis), reglas de parada (para detener el proceso de análisis de alternativas) y reglas de decisión (para elegir una de las alternativas). Esta secuencia lógica es una forma de concebir el problema que le permite al investigador entender cómo los decisores enfrentan las tareas de decisión de acuerdo con sus habilidades y según la estructura del entorno propuesta. Con base en lo anterior Wittmann et al, (2006) desarrollan una propuesta para el análisis de la brecha energética en el caso de usuarios residenciales, la cual permite filtrar un gran número de problemas individuales de decisión en un número representativo de problemas, al agregar datos socioeconómicos y especificar los tipos de decisor representativos, agrupar datos tecnológicos y determinar tanto las alternativas de decisión como el grupo de procesos de búsqueda de información, transformación y selección mediante los cuales se toman las decisiones. Esto con el fin de facilitar una comprensión del proceso de toma de decisión que no ha sido posible con otras metodologías.

Para construir este modelo, Wittmann y sus coautores utilizan herramientas metodológicas ya conocidas, tal es el caso del concepto de Social Milieus como herramienta de clasificación de individuos, la cual consiste en distinguir diferentes grupos homogéneos que comparten aspiraciones, valores y estilos de vida similares, para determinar, de acuerdo con el contexto, sus actitudes frente a la sociedad, el trabajo, la familia, sus preferencias de inversión, sus niveles de consumo o su preocupación por el ambiente. Los parámetros de la clasificación que utilizan en el modelo se obtienen de un software conocido como SINUS-Milieu-Typology (Wittmann, 2006) el cual especifica los comportamientos de cada tipo de decisor (e.g. Líder tecnológico, Tradicionalista) haciendo posible determinar (suponer) un ingreso disponible, los objetivos de decisión y su importancia relativa para cada tipología. Para las alternativas de decisión, eligen aquellas opciones tecnológicas de eficiencia energética disponibles en el mercado. Las herramientas de búsqueda, transformación

y selección que usan los decisores, así como sus niveles de satisfacción y otras heurísticas son supuestas.

Es importante destacar el avance metodológico en la aplicación de los principios de racionalidad limitada logrado por Wittmann y sus coautores, sin embargo, la principal limitación expresada por los autores es la falta de parametrización con datos reales, además de su carácter específico que obliga a delimitar la aplicabilidad del modelo aún para problemas similares. Ambas limitaciones se hacen evidentes en el caso de estudio que compete a este artículo, puesto que el uso de tipologías de decisor que tienen un origen general en estudios de mercados diseñados para individuos no aplica en el caso de organizaciones industriales. De igual modo, una suposición de parámetros sin evidencia real le resta aplicabilidad al modelo.

La aproximación que se propone en este artículo consiste en construir un modelo del proceso de toma de decisión de usuarios industriales frente a la cogeneración siguiendo la metodología propuesta por Gingerenzer y Selten (2001), pero complementado con un estudio empírico que permita parametrizar el modelo con datos técnicos, económicos, organizacionales y del entorno industrial, reales. Este modelo computacional del proceso de decisión, permitiría explorar diferentes tipos de decisores (representativos), sus estrategias, la forma en que buscan y evalúan las alternativas, cómo interpretan la estructura del entorno y cómo todos estos conceptos pueden conducir a tomar decisiones no óptimas. Dado que en la literatura no se encuentran trabajos que especifiquen cómo construir un modelo de racionalidad limitada, ni sus aspectos metodológicos, ni sus herramientas de modelamiento, ni las formas de validación, de una manera estructurada, es necesario establecer una metodología para el proceso. Esto constituye un reto para una investigación de este tipo, pero a la vez posibilita un nuevo aporte en la materia.

A continuación se presenta una propuesta metodológica para la construcción del modelo, cuales serían las limitaciones y sus posibles contribuciones.

### **3.1. Construcción del modelo de Racionalidad Limitada**

La metodología a seguir trata de superar las limitaciones encontradas por Wittmann y sus coautores (2006) y se describe como una serie de pasos y sus posibles aproximaciones.

- a) Diseñar la estructura conceptual del modelo. Para esto es necesario compilar las observaciones de los trabajos Descriptivos y hacer uso de algunas herramientas desarrolladas en la aproximación Informática como son los criterios económicos de decisión. En esta etapa se definen las tipologías de decisor, lo cual constituye una de las mayores dificultades y se explica mas adelante.
- b) Realizar un estudio empírico para parametrizar el modelo con datos asociados al usuario industrial como decisor y a su escenario energético como entorno. En esta etapa es fundamental hacer uso de indicadores que den cuenta del comportamiento de variables que son relevantes en el proceso de toma de decisión desde una perspectiva Matemático-Estadística.
- c) Construir el algoritmo de programación computacional del modelo, con base en la estructura conceptual y la parametrización empírica. Aunque los modelos de Racionalidad Limitada no se rigen bajo los mismos principios de los programas desarrollados bajo la perspectiva Informática, las subrutinas de cálculo de algunas variables permanecen iguales y son aplicables al modelo.
- d) Verificar la aplicabilidad del modelo. Dado el carácter específico del modelo se propone que la aplicabilidad se verifique mediante casos de estudio que permitan abarcar los tipos de decisor y de entornos para los cuales se desarrolla el modelo.
- e) Realizar un análisis de la influencia de las diferentes tipologías de decisor, de las heurísticas que utiliza y del entorno, en el resultado final de decisión, con el fin de identificar factores clave detrás del fenómeno de la paradoja energética en la cogeneración, para lo cual se requieren todas las aproximaciones.

### **3.2. Posibles Contribuciones**

Teniendo en cuenta los últimos desarrollos en el modelamiento de la racionalidad limitada en los procesos de toma de decisión, los aspectos más significativos y que constituirían aportes al conocimiento en esta materia serían:

- a) El enfoque al carácter organizacional del usuario industrial merece un tratamiento particular del problema de toma de decisión que no ha sido abordado desde la teoría de racionalidad limitada.

Una exploración a la toma de decisión en organizaciones [28]-[29]-[30] permitirá incluir en el modelo comportamientos (heurísticas) propios de este tipo de decisor que se pueden constituir en un marco de referencia para abordar problemas similares de decisión en organizaciones.

- b) Un método de clasificación como el Social Millieus para usuarios residenciales usado por Wittmann y sus coautores no está disponible para el caso que compete a este artículo, por lo que es necesario desarrollar una clasificación de tipologías de decisor aplicables a usuarios industriales y que sea relevante para el problema de decisión. Para esto se pueden analizar las diferentes estructuras y comportamientos organizacionales ya identificados por otros autores y definir aquellas tipologías que sean aplicables al modelo [31]-[32]-[33]. Esto se constituiría en una contribución importante del trabajo puesto que puede ser utilizada en otros trabajos de investigación.
- c) Una herramienta de este tipo facilitaría la comprensión de los comportamientos detrás del fenómeno de la poca adopción y ayudaría a definir acciones tendientes a aumentar las tasas de implementación, más cuando se evidencia un interés de diversos agentes en aprovechar un nicho de mercado, los cuales al tener una mayor claridad de la toma de decisión de los clientes potenciales, puedan guiar sus estrategias de venta. De igual modo, permitiría orientar a otros agentes como el Gobierno, Regulador o Empresas de Energía en sus tareas de promoción, regulación y evaluación de sus estrategias comerciales respectivamente. adicionalmente, serviría para alertar a los mismos usuarios industriales al hacerlos concientes del uso de procedimientos no optimizadores.

### **3.3. Limitaciones**

Una limitación del modelo a desarrollar es su carácter específico debido a la naturaleza de los modelos de racionalidad limitada. Las heurísticas, más que estrategias universales, se dan en cierta clase de situaciones, pero no son herramientas holísticas como pueden llegar a ser los cálculos de optimización. Sin embargo, esta limitación no representa un inconveniente relevante mientras se especifique correctamente el dominio para el cual se evalúa su aplicabilidad.

Otra limitación que si puede representar un problema fundamental en la investigación, es la gran dependencia que se tiene de la evidencia empírica para la parametrización del modelo. Para lograr que este se aproxime al proceso de toma de decisión de los usuarios industriales, es necesario que el estudio empírico que complementa el modelo se lleve a cabo de manera cuidadosa para que la propuesta metodológica y el modelo sean aplicables y facilite un análisis y comprensión del problema.

## **4. CONCLUSIONES**

Respecto al problema específico de la paradoja energética para el caso de la cogeneración, el estudio de la toma de decisión a nivel del usuario industrial en la literatura es limitado, una posible razón es la idea generalizada de que las organizaciones industriales toman decisiones más “racionales” que los individuos comunes y por lo tanto se supone su comportamiento optimizador. En general, se ha hecho un mayor esfuerzo en el desarrollo de herramientas de soporte a la toma de decisión desde un punto de vista del Gobierno o de empresas de energía en las áreas de eficiencia energética y fuentes alternas de energía, sin embargo, los cálculos sofisticados, avances tecnológicos o el diseño de políticas pueden ser poco efectivos si los proyectos no son implementados por quienes tienen el potencial de hacerlo, particularmente en el caso de los mercados no regulados de energía como son los usuarios industriales.

En este artículo se articula una propuesta con una marcada orientación aplicada y con fundamentación teórica, basada en un estudio de las características particulares del decisor y de su entorno. Lo anterior requiere un tratamiento interdisciplinario del problema que integre principios teóricos de Ingeniería, Economía y Ciencias del Comportamiento, y que reconozca los aportes y limitaciones de cada disciplina. El resultado sería un modelo computacional de cómo decide el usuario industrial (no herramienta de soporte sobre cómo debería decidir) basado en una aproximación integradora, y cuya metodología puede ser replicable a otros problemas que enfrentan investigadores en diferentes áreas del conocimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ackermann, T., 2004. Distributed Resources in a Re-Regulated Market Environment. Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Royal Inst. For Technology, Stockholm, Sweden.
- Bailey, O. et al, 2003. Distributed energy resources in practice: A case study analysis and validation of LBNL's customer adoption mode Tech. Rep. LBNL-52753. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- Bonilla, D., Akisawa, A., Kashiwagi, T., 2003. Modelling the adoption of industrial cogeneration in Japan using manufacturing plant survey data. *Energy Policy* 31, pp. 895-910.
- Botero, S., 2002. Energy efficiency business options for industrial end users in Latin American competitive energy markets. Ph.D. dissertation, George Washington Univ. Washington, D.C.
- Bullock, D., Weingarden, S. L., 2006. Combined Heat & Power (CHP) in the Gulf Coast Region: Benefits and Challenges. Gulf Coast CHP Application Center, The Woodlands, TX.
- Burns, T., Stalker, G. M., 1961. *The Management of Innovation*. Tavistock, London.
- Casten, T. R., Downes, B., 2006. Optimizing power: How DG could cut costs by 40%. *Cogeneration & On-Site Power Production* 5, pp. 45-55.
- Franco, C.J., 2002. Racionalidad limitada del consumidor en mercados energéticos desregulados y la función del comercializador y el gobierno. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Gigerenzer, G., Selten, R., 2001. *Bounded Rationality: The Adaptive Toolbox*. The MIT Press.
- Howart, R. B., Haddad, B. M., Paton, B., 2000. The economics of energy efficiency: insights from voluntary participation programs. *Energy Policy* 28, pp. 477-486.
- Jaffe, A. B., Stavins, R. N., 1994. The energy paradox and the diffusion of conservation technology. *Resource and Energy Economics* 16(2), pp. 91-122.
- Kahneman, D., Tversky, A., 2000. *Choices, Values and Frames*. Cambridge University Press., Cambridge, p. 840.
- Lambin J. J., 1991. *Marketing estratégico*. Segunda Edición. McGraw Hill. Mexico.
- Ellison, G., 2006. Bounded rationality in industrial organization. MIT and NBER Working paper.
- Madlener, R., Wickart, M., 2004. Diffusion of cogeneration in Swiss industries: economics, technical change, field of application, and framework conditions. *Energy and Environment* 15 (2), pp. 223-237.
- Mintzberg, H., 1979. *The Structuring of Organizations*. Prentice Hall, New Jersey.
- Mueller, S., 2006. Missing the spark: An investigation into the low adoption paradox of combined heat and power technologies. *Energy Policy* 34, pp. 3153-3164.
- Neves, L.P., et al, 2008. A Multi-criteria decision approach to sorting actions for promoting energy efficiency. *Energy Policy* 36, 2351-2363.
- NREL, 2005. HOMER User Guide. National Renewable Energy Laboratory, Kansas City, MO. [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/homer>.
- Organ, D. W., Hamner, W. C., 1982. *Organizational Behavior: An applied Psychological Approach*. Business Publications, Inc. Dallas, Texas.
- Pepermans, G. et al, 2005. Distributed generation: definition, benefits and issues *Energy Policy* 33, pp. 787-798.
- Prabhu, J., 1998. Strategy-based segmentation of industrial markets. *Industrial Marketing Management* 27, pp. 305-313.
- Resource Dynamics Corporation - CSGI, 2001. Assessment of replicable innovative industrial cogeneration applications Industrial Center, Inc, Vienna, VA.
- RETSscreen, 2007. Clean Energy Project Analysis Tools, RETScreen International, Canada. [Online]. Available: <http://www.retscreen.net>.
- Russell, C., 2006. Energy Management Pathfinding: Understanding Manufacturers' Ability and Desire to Implement Energy Efficiency. *Strategic Planning for Energy and the Environment* 25(3), pp. 20-54.
- Sandberg, P., Söderstöm, M., 2003. Industrial energy efficiency: the need for investment decision support from a manager perspective. *Energy Policy* 31, pp. 1623-1634.
- Schleich, J., Gruber, E., 2008. Beyond case studies: barriers to energy efficiency in commerce and the service sector. *Energy Economics* 30. pp. 449-464.
- Shama, A., 1983. Energy conservation in US buildings: Solving the high potential/low adoption paradox from a behavioral perspective. *Energy policy* 11(2), pp. 148-164.
- Siddiqui, A. S. et al, 2003. Distributed energy resources with combined heat and power applications, Tech. Rep. LBNL-52753. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.

- Simon, H., 1979. Rational decision making in business organizations. *The American Economic Review* 69(4), pp. 493-513.
- Sorrell, S., et al, 2000. "Reducing barriers to energy efficiency in public and private organizations," SPRU, Univ. of Sussex, Brighton, UK.
- Strachan, N., Dowlatabadi, H., 1999. *The Adoption of a Decentralized Energy Technology: The Case of UK Engine Cogeneration*. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, Saratoga Springs, NY.
- UPME, 1997. *Desarrollo del potencial de cogeneración en el país*. Unidad de Planeación Mineroenergética, Bogotá.
- Wang, J.J., et al, 2009. Review on Multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 2263-2278.
- Wittmann, T., et al, 2006. *A Bounded Rationality Model of Private Energy Investment Decisions*. SSRN 2006 Annual Meeting. [Online]. Available: <http://ssrn.com>
- Woodruff, E. A., Turner, W. C., 1998. Financial Arrangements for Energy Management Projects. *Energy Engineering*, 95(3), pp. 23-71.