



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE ECONOMÍA

**EXERGÍA Y ECONOMÍA: BENEFICIOS ECONÓMICOS
DE LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA EN
LOS PROCESOS INDUSTRIALES**

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN ECONOMÍA PRESENTA
RICARDO IVÁN CARPIO FRAGOSO

ASESOR
MAESTRO DANIEL ALEJANDRO PACHECO ROJAS

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico esta obra a mis padres: sin su amor y comprensión, jamás hubiera logrado mis propósitos.

Agradezco a mis hermanos, por el apoyo que siempre me han brindado, y a sus familias.

También me gustaría hacer mención de todos mis amigos y familiares, así como de mi tutor y sinodales.

Finalmente, y no menos importante, agradezco a Dios por las oportunidades que me ha otorgado.

Indice

Introducción.	1
Capítulo I. El papel de la energía en el ámbito industrial	9
I.1. La industria contemporánea.	9
I.1.1. La industria del papel.	10
I.1.2. La industria del vidrio.	12
I.1.3. La industria del hierro.	14
Capítulo II. Las propiedades físicas de la energía	17
II.1. Conceptos básicos.	17
II.2. Formas de energía.	18
II.3. Transferencia de energía por calor y trabajo.	19
II.4. Transferencia de energía por flujo másico.	22
II.5. La primera ley de la termodinámica.	25
II.6. La segunda ley de la termodinámica.	26
II.7. Procesos reversibles e irreversibles.	28
II.8. La máquina térmica de Carnot.	30
II.9. Entropía.	32
II.10. Principio de incremento de entropía: generación de entropía.	35
II.11. Las ecuaciones $T ds$.	38
II.12. Exergía.	40
II.13. Trabajo reversible e irreversibilidad.	42
II.14. Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa.	43
II.15. Principio de disminución de exergía: destrucción de exergía.	44
II.16. Eficiencia según la segunda ley de la termodinámica.	47
Capítulo III. Los flujos de exergía en los sectores económicos.	49
III.1. Una visión histórica de la termoeconomía.	49
III.2. Fundamentos de la teoría del costo exergético.	52
III.3. Las estructuras física y productiva.	54
III.4. La determinación de los costos exergético y exergoeconómico.	57
III.5. El proceso de formación de costos.	60
III.6. La eficiencia termodinámica productiva $\eta_{P,n}^*$.	62
Capítulo IV. La función termoeconómica de producción.	65
IV.1. El ingreso nacional.	65
IV.2. Producto Interno Bruto real.	66
IV.3. La función de producción.	67
IV.4. La productividad total de los factores.	70
IV.5. El progreso tecnológico.	73
IV.6. La función de producción y la eficiencia productiva.	75
IV.7. Crecimiento por productividad y por eficiencia.	77

IV.8. La productividad total reversible de los factores A_{rev} .	79
Capítulo V. Estudio de casos.	86
V.1. Secado de subproductos de plantas de beneficio de aves en Colombia.	86
V.2. Estudio de factibilidad de planta térmica de cogeneración en México.	89
V.3. Simbiosis industrial de Kalundborg, Dinamarca.	93
V.4. Sector energético de la República Mexicana.	99
V.5. Modelo toyotiano de producción automotriz.	101
V.6. La innovación en Estados Unidos y la manufactura mexicana.	105
Capítulo VI. Impactos macroeconómicos de la expansión exergetica.	112
VI.1. El modelo del ciclo económico real.	112
VI.2. La elección del consumidor y el productor.	113
VI.3. El sistema de preferencia ocio-consumo.	116
VI.4. La elección ocio-consumo.	118
VI.6. La elección del consumo intertemporal.	119
VI.7. El mercado de trabajo.	122
VI.8. El mercado monetario.	124
VI.9. El vaciado del mercado de bienes.	127
VI.10. Choques transitorios por expansión exergetica.	128
VI.11. Choques permanentes por expansión exergetica.	129
Conclusiones.	131
Bibliografía.	133

Introducción

Ocho años después de la crisis financiera mundial, el PIB per cápita se ha mantenido en niveles previos a la crisis, o incluso inferiores, en muchas economías. En algunas economías europeas, entre ellas Finlandia, Italia y España, el PIB per cápita en 2015 (en términos reales) fue alrededor del 10% inferior al nivel alcanzado en 2007. De hecho, entre los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), sólo pocos países, especialmente Corea, Polonia y Turquía, experimentaron una mejora significativa con respecto a los niveles anteriores a la crisis (OCDE, 2017, p. 16).

Aunque las economías emergentes obtuvieron resultados mucho mejores de crecimiento, en el resto de los países las tasas de cambio de la producción han disminuido considerablemente en el periodo posterior a la crisis. El panorama general apunta a la desaceleración de las tasas de crecimiento en la mayoría de los países, en comparación con el periodo anterior a la crisis, y se teme que muchos queden atrapados en un entorno de bajo crecimiento, ya que el crecimiento de la productividad continúa su declive a largo plazo en la mayoría de las economías (OCDE, 2017, p. 16).

El crecimiento económico puede fomentarse aumentando los insumos de mano de obra y capital utilizados en la producción, o mejorando la eficiencia general con la que estos insumos se utilizan conjuntamente, es decir, mediante el crecimiento de la productividad total de los factores. La contabilidad del crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) implica su descomposición en estos tres componentes. Como tal, ésta proporciona una herramienta esencial para que los responsables de la formulación de políticas identifiquen los motores subyacentes del crecimiento (OCDE, 2017, p. 52).

Un elemento que sin duda afectó el crecimiento en el caso especial de la economía mexicana fueron los episodios recurrentes de inestabilidad macroeconómica de la crisis de la década de los años ochenta. Sin embargo, desde mediados de los años noventa se comenzaron a adoptar una serie de reformas para fortalecer el marco de políticas macroeconómicas y brindar mayor

certidumbre a los agentes económicos: la autonomía del Banco de México, un régimen de libre flotación cambiaria, la aprobación de la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria, así como una mejor regulación y supervisión financiera (DOF, 2013).

Las acciones mencionadas han disminuido la preocupación por el crecimiento, lo que se traduce en mejores condiciones para el financiamiento del desarrollo de nuestro país. Sin embargo, aún bajo el sólido entorno macroeconómico que se ha construido, el crecimiento de la economía sigue siendo cercano al 2.0% anual. Ello sugiere que es necesario complementar las políticas macroeconómicas que se han adoptado con políticas que promuevan el desarrollo de la actividad económica y, al mismo tiempo, la disminución de las brechas observadas entre estados y regiones (DOF, 2013).

La producción de bienes y servicios de una economía es el resultado de los factores de producción que utiliza como insumos (el factor trabajo, el acervo de capital, la tierra y otros recursos naturales) así como de su productividad total. El bajo crecimiento económico de México podría ser resultado de una lenta acumulación de factores, explicada, por ejemplo, por bajos niveles de inversión en capital humano o en maquinaria, equipo e infraestructura; por ganancias modestas en productividad, ya sea debido a que el desarrollo y adopción de nuevas tecnologías que aumenten la eficiencia de los procesos de producción es insuficiente o a que los factores de producción no se utilicen en actividades con el mayor potencial productivo; o a una combinación de ambas explicaciones (DOF, 2013).

El lento crecimiento de México no es resultado de una inadecuada acumulación de factores. Por una parte, el acelerado crecimiento demográfico de nuestro país en décadas pasadas se tradujo en un rápido crecimiento de la población económicamente activa. Adicionalmente, la expansión de la fuerza laboral se dio en paralelo a un aumento en las años de escolaridad promedio de los mexicanos que aumentó en casi siete años entre 1950 y 2010, aumento comparable al observado de Corea y superior al de países como Brasil, Chile y

Estados Unidos durante el mismo periodo. En lo que toca a la baja acumulación de capital, cabe señalar que las tasas de ahorro y de inversión de nuestro país son superiores al promedio latinoamericano y que el capital disponible por trabajador ha aumentado más rápidamente en México que en países comparables de la región (DOF, 2013).

Todo esto sugiere que la principal causa detrás de la modesta expansión de nuestra economía es la baja productividad. La productividad en México se expandió rápidamente entre 1950 y 1970 (a una tasa anual de 4.1%) durante la etapa conocida como el Desarrollo Estabilizador. No es casual que dicho periodo haya coincidido con un rápido proceso de migración del campo a la ciudad, que llevó a un buen número de trabajadores que anteriormente desempeñaban actividades agrícolas de baja productividad, a ocupar plazas en la incipiente industria manufacturera (como consecuencia de la política de industrialización a través de la sustitución de importaciones) y un sector de servicios que se beneficiaba de economías de aglomeración asociadas a la urbanización (DOF, 2013).

Posteriormente, sucedió un periodo de estancamiento en el que la productividad creció en sólo 0.4% anualmente entre 1970 y 1980, debido a que las ganancias de la sustitución de importaciones se agotaron y al inicio de un periodo de inestabilidad financiera y macroeconómica, afectado por choques recurrentes del exterior. Posteriormente vino una aguda contracción de la productividad: entre 1980 y 1995, ésta se contrajo a una tasa anual de 2.4%. La crisis de la deuda y la estatización de la banca dieron lugar a una profunda crisis financiera que impactó la actividad económica y la productividad (DOF, 2013).

La eficiencia de la economía ha seguido cayendo a lo largo de los últimos dos décadas. La nueva estadística oficial sobre productividad, presentada por INEGI en agosto de 2013, muestra que la productividad total de los factores en 2011 fue 8.2% menor a la que existía en 1990 –una contracción anual de 0.4%, en promedio-. El único sub periodo en el cual la productividad creció fue entre 1996 y 2000, a medida que la economía se recuperaba de la crisis financiera, impulsada

por la expansión de las exportaciones y la creciente integración con América del Norte (DOF, 2013).

En contraste, en la última década la productividad cayó, no obstante la consolidación de una gestión macroeconómica responsable. Sin duda la economía mexicana se vio afectada por choques externos que incidieron en la productividad, como la recesión de los Estados Unidos desde 2001, el surgimiento de China en los mercados internacionales o la “Gran Recesión” mundial que inició en 2008 (DOF, 2013).

A pesar de la importancia central que juega en el proceso de crecimiento, en México no existía hasta hace poco una medición oficial de la productividad total de los factores. La información que suele utilizarse para hablar del tema proviene de estudios académicos y se basa en ejercicios de contabilidad del crecimiento, los cuales buscan cuantificar el aporte que el aumento de la productividad y de los factores productivos tiene sobre el crecimiento económico. Tal carencia se explica, al menos en parte, porque, a diferencia del concepto de productividad laboral, que es menos intensivo en datos y tiene una interpretación más sencilla (la producción por cada trabajador empleado), estimar la productividad total de los factores involucra una cantidad considerable de información que a veces no es directamente observable (DOF, 2013).

También hay que añadir que los análisis disponibles de la productividad total de los factores hacen uso de supuestos simplificadores. Por ejemplo, los ejercicios de contabilidad del crecimiento estiman la productividad como un residual para reconciliar el producto observado con lo que no puede atribuirse a los factores productivos, lo que ha dado a que la productividad sea considerada, en realidad, como una medida de nuestra ignorancia (DOF, 2013).

Para la contribución al importante estudio y debate de la productividad total y el crecimiento económico, el objetivo general de la presente tesis de licenciatura es la contextualización de dicho fenómeno económico con otras ramas del conocimiento contemporáneo, para vincular la teoría del crecimiento económico con las técnicas de contabilidad de costos físicos productivos, con impactos

microeconómicos y macroeconómicos. Se contrastará la siguiente hipótesis de constatación (primer grado), según la clasificación de (Dieterich, 1996, pp. 119-124), a través de una investigación documental:

“El ahorro de energía en el proceso productivo implica crecimiento económico”.

A pesar de la sencillez de la presente proposición, se logrará llegar a una síntesis entre la teoría del productor y la termoeconomía, que es una disciplina relacionada con el diseño de los sistemas asociados con sus costos correspondientes, para la optimización de su diseño y operación, esenciales en casi todas las industrias y ejemplos de la vida cotidiana (Moran & Shapiro, 2004, p. 353).

Para el contraste de la hipótesis se usará el modelo del ciclo económico real, al tiempo que se analizarán los supuestos más relevantes que hay detrás de cuatro macromercados (trabajo, bienes, crédito y dinero). Se situará el concepto económico de la productividad total de los factores con la termoeconomía, dada su capacidad para describir sistemas en relación a ambientes físicos (presión, temperatura, y potenciales químicos) y económicos (precios de los bienes o del capital, o tasas de interés), interrelacionándolos por costos basados en cantidades físicas (Wall, 1991, p. 337).

El método exergético de la termoeconomía es una poderosa herramienta para evaluar las eficiencias termodinámicas y las pérdidas de sistemas y procesos. Desde el comienzo y a través de su evolución este método ha sufrido recientemente una evolución significativa y ha sido adoptado en muchas aplicaciones de ingeniería (Palazzo, 2013, p. 1).

En específico, en la composición se utilizará la teoría del costo exergético, que nos dará una idea de que los flujos de materias primas del proceso productivo que llevan al producto terminado pueden describirse en términos de la exergía encarnada en ellos. Se llegarán a dos conceptos útiles para el estudio de la producción, a nivel tanto microeconómico como macroeconómico; a saber:

- La eficiencia termodinámica productiva $\eta_{p,n}^*$. Representará la calidad termodinámica real de un proceso productivo. Un cambio positivo en su valor (que oscilará entre 0 y 1) representará un proceso que será conocido como expansión exergética y será equivalente al ahorro de energía y materiales de la producción.
- La productividad total reversible de los factores A_{rev} . Será la eficiencia general que reflejará el nivel de adaptación de la mano de obra al flujo de energía disponible en el medio ambiente de referencia por medio del uso de capital productivo, en condiciones técnicas de completa reversibilidad.

El estudio de la teoría del costo exergético requiere un repaso de los conceptos más importantes de la termodinámica, por lo que también se abordan en el presente trabajo, aparte de la importancia del estudio de la energía en el sector productivo por ser considerada como la capacidad para causar cambios (Çengel & Boles, 2012, p. 1). La dinámica de la energía en el sistema productivo se constatará mediante una breve descripción de sus interacciones en la industria contemporánea.

Descripción.

El documento se estructura en seis apartados:

En el capítulo I, se da una introducción general con información referida al sector industrial, así como a su consumo de energía. Se hace especial énfasis en las industrias del papel, vidrio y hierro, por representar los pilares sobre los que se levantó la Revolución Industrial en el siglo XIX. El tratamiento de la información obtenida en (Océano, 1990), (UNAM, 2017), (UPME, 2009a) y (Díez Díaz-Estébanez, 2013) es de tipo resumen.

En el capítulo II, se exponen las características que satisface la energía en cualquier sistema de referencia. Se remarcan los conceptos de eficiencia según la primera y la segunda ley de la termodinámica, así como generación de entropía y

destrucción de exergía. La información se obtuvo de (Çengel & Boles, 2012) y (Jaramillo Salgado, 2007).

En el capítulo III, se ofrece la información más pertinente del procedimiento para el cálculo de los costos exergéticos y exergoeconómicos de un sistema productivo, de (Lozano & Valero, 1993). Después se hace una extensión analítica de este proceso al conglomerado industrial y de servicios de toda una economía para llegar a la definición de eficiencia termodinámica productiva $\eta_{p,n}^*$. Asimismo, se usan los trabajos de (Valero & Torres Cuadra, 2009) para hablar acerca del desarrollo histórico de la termoeconomía y de (Sciubba, 2012), (Rosen, 2008) y (Palazzo, 2013) para complementar la idea de que las mercancías finales pueden ser descritos en términos de la exergía necesaria para producirlos.

En el capítulo IV, se usa la obra de (Mankiw, 2014) para hablar de la contabilización de las actividades industriales, hasta llegar a su descripción mediante la función convencional de producción y a la teoría que hay detrás de la productividad total de los factores. Posteriormente, se plantea una versión modificada de la función convencional de producción para incorporar la eficiencia termodinámica productiva $\eta_{p,n}^*$; se usan los trabajos de (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991), (Pérez, 1992), (Pérez, 2004) y (Sánchez, 2014) para dar sustento teórico al concepto de productividad total reversible de los factores A_{rev} , y se define el concepto de expansión exergética.

En el capítulo V, se muestran ejemplos bajo los cuales se pretende ilustrar los beneficios económicos del análisis exergético con información de (Silva Larrotta, 2015), (Torres González et al., 2017), (Costa Sorolla, 2011) y (Pacheco Rojas, 2016). Asimismo, se comentan casos concretos en torno a los conceptos de la eficiencia termodinámica $\eta_{p,n}^*$ y la productividad reversible A_{rev} con ideas de (Stiglitz, 2000), (Pérez, 2004), (Boyer & Freyssenet, 2001), (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991), (Ayala Espino, 1996), (Dussel Peters, 1997), (DOF, 2013) y (Gobierno de la República, 2017)

En el capítulo VI, se muestra, finalmente, que el ahorro de energía y materias primas en el proceso productivo conlleva crecimiento económico,

mediante el modelo del ciclo económico real, con una síntesis de la obra de (Cervantes Jiménez, 2014) y el concepto de expansión exergética.

Capítulo I. El papel de la energía en el ámbito industrial

I.1. La industria contemporánea.

La tecnología es ciencia aplicada (Océano, 1990, p. 988), entendiendo en este caso por ciencia al conjunto de materias y disciplinas que integran el ámbito de estudio de la naturaleza y los fenómenos que en ella tienen lugar. Del estudio de la naturaleza nacieron disciplinas como la física, la química, la astronomía, la biología, entre otras, en la frontera de los siglos XVIII y XIX.

La formación de nuevos mercados, los descubrimientos de nuevas materias primas y una nueva dinámica social crearon las condiciones para que la teología científica abandonara su reclusión e hiciera realidad lo que soñaran un día los promotores de la Ilustración del siglo XVIII: la independencia de la ciencia y la materialización de una nueva idea de progreso (Océano, 1990, p. 988).

La ciencia de la naturaleza salió, pues, de las aulas universitarias, de los círculos de sabios, se instaló en las ciudades y dio origen al nacimiento de la fábrica, sede de nuevas profesiones, de rentabilidades económicas y de experimentación de nuevas tecnologías. Prescindiendo de la rama de los servicios, la industria contemporánea puede dividirse en (UNAM, 2017):

- Industria extractiva. Se dedica a la exploración, detección, descubrimiento, extracción, procesamiento, almacenamiento, transportación y comercialización de diferentes recursos como: petróleo, gas natural, así como de materias primas de origen mineral metálico y no metálico provenientes del suelo y el subsuelo. Todos estos materiales constituyen la parte esencial de los insumos que se requieren para una amplia variedad de procesos productivos.
- Industria de la transformación básica. Está destinada al diseño, construcción, adaptación, operación, mejora y mantenimiento de las plantas industriales dedicadas a la fundición de metales como el hierro, el acero, etc. Incluye la construcción de maquinarias, equipos, herramientas e instrumental, así como el aprovechamiento de la petroquímica básica. A su

vez, todos los productos generados son utilizados en otras industrias para producir bienes de consumo.

- Industria de bienes de consumo. Se encarga del análisis, diseño y aplicación de métodos, tecnologías y técnicas aplicables a los procesos productivos dedicados a la transformación de la materia prima en bienes de consumo social provenientes de la industria manufacturera. Comprende diversas industrias como: farmacéutica, alimentos, vestido, calzado, automotriz (autopartes), electrodoméstica, vidrio, hule, petroquímica secundaria, entre otras.

I.1.1. La industria del papel.

El papel es un producto de la compleja elaboración tecnológica y, a primera vista, puede hacerse difícil entender que proviene del mundo vegetal. El papel se obtiene de la mezcla de la celulosa, extraída de los vegetales mediante técnicas químicas, con la llamada pasta de madera, extraída por procedimientos mecánicos. La celulosa proporciona al papel sus cualidades estéticas, como opacidad y morbidez. Posteriormente, sustancias químicas diversas proporcionarán las cualidades necesarias para los diversos usos (Océano, 1990, p. 990).

En los últimos tiempos se emplean también para la elaboración del papel materias fibrosas provenientes del vidrio y de las sustancias químicas llamadas polímeros, aunque las materias primas básicas siguen siendo las citadas en primer lugar. El papel como material para la escritura estuvo históricamente precedido por sustitutos que cumplían su misma función: huesos, piedras pulimentadas, metales blandos (plomo), tablas de barro, tablillas de madera recubiertas con una capa de cera, el papiro y el pergamino. Estos dos últimos alcanzaron una mayor difusión (Océano, 1990, p. 990).

La producción de la hoja de papel se basa en el proceso de filtración, mediante el cual es posible unir entre sí las fibras celulósicas que se encuentran en suspensión en el agua, la cual llena los espacios que separan los haces

fibrosos. Estos absorben en su superficie, por medio de acciones fisicoquímicas, parte del agua; el resto de ésta queda en los espacios más finos, por capilaridad, y mecánicamente en los más gruesos. Cuando al secarse la hoja de papel, se elimina el agua, las fuerzas que unían las moléculas de agua y las de celulosa tienden a reunir entre sí los haces y a hacerlos más coherentes (Océano, 1990, p. 991).

La materia prima de la que se extrae la celulosa es la madera de algunas especies de abetos y numerosos pinos, la especie elegida influirá en la calidad del papel que se obtendrá. Antes de su proceso de fabricación, el periodo de almacenaje de la madera es de 3-8 meses para que repose y se seque. Posteriormente se realiza el descortezado del tronco bajo una cortina de agua a presión que elimina fragmentos sin utilidad para después meterlos a los desmenuzadores que los fragmentarán en astillas o chips para facilitar las posteriores operaciones químicas (Océano, 1990, p. 991).

La cocción, llamado también lixivación, consiste en el tratamiento químico de la madera mediante sales en disolución acuosa, con técnicas tales como de la sosa, del sulfato y del bisulfito cálcico. La pasta de madera es la sustancia que se obtiene mediante procedimientos mecánicos; su proceso inicia con la desfibración, para luego ser cribada y por último refinada (Océano, 1990, p. 992).

Finalmente la formación de la hoja de papel se consigue mediante la máquina continua plana, que trabaja con un ciclo de actividad permanente. La pasta proveniente del refinado; se somete a mezcla, dosificación y depuración. Con las hojas de papel obtenidas se procede al secado, realizado en máquinas con cilindros calentados internamente por entre los cuales circula la hoja. El estucado es una operación auxiliar que consiste en dar blancura, alisamiento, abrillantamiento, etc. Asimismo, el acabado consiste en eliminar partes defectuosas o mal secadas (Océano, 1990, p. 993).

Dentro del proceso de fábrica de pastas y papel se requiere en todos los casos energía eléctrica, desde el comienzo hasta el final del proceso, ya que todas las etapas los necesitan. En cuanto al consumo de vapor, no siempre se requiere

y sólo determinadas etapas lo utilizan. Las necesidades energéticas están estrechamente vinculadas con el tipo de producto, el volumen de producción y el tamaño de los centros productivos, por razones intrínsecas a los procesos de fabricación, que están determinados energéticamente por factores de escala. La industria papelera consume energía en una doble vertiente: electricidad para mover la maquinaria y vapor para secar la pasta y el papel (UPME, 2009a, p. 7).

El agua tiene una gran importancia en la fabricación de papel. Es una especie de cinta transportadora, ya que facilita el transporte más económico de las materias, al a vez que permite la mezcla homogénea de las mismas y una distribución uniforme en la formación de la hoja. La precipitación de las sales de calcio y magnesio debido a la alcalinidad de la solución afectará el intercambio de calor, disminuyendo el coeficiente de transmisión de calor. El proceso de la industria del papel requiere grandes cantidades de vapor, el cual es provisto por calderas de recuperación (UPME, 2009a, p. 9).

I.1.2. La industria del vidrio.

El vidrio es un producto no cristalino que a la propiedad plástica de los líquidos asocia la tenacidad de los sólidos. Puede considerarse como líquido de elevada viscosidad y que, por consiguiente, no presenta un punto de fusión definido, sino que varía su viscosidad cuando se le somete a calentamiento, volviéndose primero pastoso y después fluido (Océano, 1990, p. 995).

Químicamente, las sustancias que pueden formar vidrios son varias. Entre los vidrios constituidos por un solo compuesto cabe citar el vidrio soluble (silicato sódico) y el vidrio de cuarzo (sílice pura); pero el vidrio, en general, es el resultado de una fusión de varios componentes: silicatos, boratos y fosfatos de metal, con calcio, bario, plomo, hierro, aluminio, etcétera (Océano, 1990, p. 995).

Para que sea posible la fabricación de vidrios es necesario que los componentes de la mezcla tengan baja velocidad de cristalización. Entre los componentes principales se haya la sílice, caliza, dolomita, sulfato sódico y sosa.

Para facilitar la fusión se utilizan el carbonato cálcico y el sulfato sódico que permiten mantener la viscosidad dentro de ciertos límites (Océano, 1990, p. 996).

El proceso de fusión está precedido por la fase de preparación de la mezcla y permite obtener una masa líquida. Se realiza en hornos de crisol (utilizados para vidrios especiales); o de cubeta (para fabricación a escala industrial). Utilizan sistemas de calentamiento como naftas, gases de coquería o gas de gasógeno, más reciente energía eléctrica, mediante electrodos móviles (Océano, 1990, p. 996).

La fusión comprende tres fases: fusión propiamente dicha, afinado, y reposado y paralizado. Durante la primera fase la masa tiende a secarse, formando un carbono doble de sodio y calcio que reacciona con la sílice, desprendiendo anhídrido carbónico, dando origen a silicatos de calcio y sodio. La formación de estos productos se produce a temperaturas de 700-900 °C; al aumentar la temperatura la masa pasa completamente al estado fundido (Océano, 1990, p. 997).

En la fase de afinado se procura obtener una masa más fluida, elevando la temperatura a 1400-1500 °C, y añadiendo anhídrido arsenioso, que hace el vidrio más fluido, tiende a evaporarse y crea un ambiente gaseoso que facilita la mezcla. Durante la fase de reposado y clarificación de la masa líquida, las partículas que han quedado en suspensión y las burbujas de gas salen a la superficie, generando una espuma que preserva las partes superiores del vidrio y que será eliminada antes de la fase de elaboración (Océano, 1990, p. 997).

Entre las técnicas de elaboración, se encuentra el prensado, que es la técnica más antigua realizada a mano con prensas. En el soplado, se introduce un tubo en el horno y extrae una parte de masa en estado pastoso adherida al extremo, colocándola a un molde esférico y soplando por el otro extremo, adquiriendo la forma del molde. En el laminado, la masa fluida se desparrama sobre superficie plana para distribuirla de manera uniforme y hacerla pasar por la abertura formada por dos cilindros en rotación que la reducen a una delgada hoja de vidrio del espesor deseado (Océano, 1990, p. 998).

La fabricación de cualquier producto de vidrio es esencialmente un proceso energético y, por tanto, la elección de la fuente de energía calor y de los sistemas de recuperación son los aspectos que rigen el rendimiento económico del proceso, la eficiencia energética de la fusión y las afecciones medioambientales que se puedan generar. En general, la energía necesaria para la fusión del vidrio supone más del 75% del total de energía consumida en el proceso de fabricación, por lo que la elección de técnicas que puedan reducir el consumo energético es de vital importancia (UPME, 2009b, p. 14).

Como ejemplos, más del 70% del total de consumo energética de una fábrica de vidrio hueco para envases corresponde al horno. De ahí que el control de la fusión y las mejoras en rendimiento mediante cualquiera de las medidas que se adopten sean tan importantes. Asimismo, más de tres cuartos de energía utilizada en una planta se gasta en la fusión de vidrio plano o laminado. En este último caso, tanto los hornos de quemadores transversales como los de bucle consumen más del 90% de la totalidad de la energía utilizada en la fábrica (UPME, 2009b, pp. 15-16).

I.1.3. La industria del hierro.

Una rudimentaria metalurgia del hierro se conocía hacia el año 3000 a. C.; probablemente, en algunas civilizaciones el uso del hierro precedió incluso al del bronce y del cobre. La primera producción de hierro esponjoso puede situarse, pues, en el citado milenio, en tanto las primeras técnicas para obtener el hierro batido se remontan a los años 1600-1000 a. C. Las primeras fusiones en fundición parecen haberse iniciado en China hacia el siglo I a. C.; unos 1500 años después, la fusión en fundición comenzó en Europa a competir con la del bronce (Océano, 1990, p. 1019).

El lento perfeccionamiento de las técnicas correspondientes a la fusión, afinado y aligación de las aleaciones ferrosas alcanzaron su máximo desarrollo en los siglos XVIII y XIX, periodo en el que se afirmaron nuevos métodos, algunos todavía utilizados en la actualidad. Entre ellos, puede destacarse el afinado por

medio de convertidor (Bessemer y Thomas) y en horno Martin-Siemens; la fabricación de fundición maleable; la producción por horno eléctrico; la desoxidación mediante aluminosilicio y manganeso; las técnicas de aligación que permiten fabricar aceros al níquel, cromo, cobalto, wolframio, etc.; las técnicas de estampación en caliente y las de laminación (Océano, 1990, p. 1019).

La siderurgia es la técnica que se utiliza para la extracción del hierro y éste se obtiene por reducción de minerales que lo contienen en forma de óxido (magnetita, oliguisto, limonita, siderita, etc.). Para lo que se utiliza carbón o un gas reductor. Según el porcentaje final de carbono, se obtienen 3 categorías de productos: hierro dulce (porcentaje mínimo de carbono), acero y fundición (Océano, 1990, p. 1019).

El proceso de fabricación depende fundamentalmente del objeto a que quiera designarse el producto, es decir, a la producción de fundición, aceros y ferroaleaciones, o a obtener hierro con la máxima pureza posible, para utilizarlo en los motores eléctricos y núcleos de transformadores por su alta permeabilidad magnética (Océano, 1990, p. 1019).

Para la producción del hierro puro se utiliza generalmente la electrolisis de una solución de cloruro férrico en cloruro cálcico. En ocasiones se obtiene reduciendo con hidrógeno los óxidos purificados; el producto obtenido en forma de polvo es sometido luego a un proceso de sinterización (Océano, 1990, p. 1019).

Presenta importancia fundamental la producción de hierro aleado con carbono de cara a la producción de aceros y fundición; para este fin se utiliza el horno alto, que proporciona la llamada fundición de primera fusión, con un contenido de 3-4% en peso de carbono y otros ligantes secundarios (Océano, 1990, p. 1019).

Aproximadamente, un 65% de la producción mundial de acero está basada en la producción de arrabio, donde el coque es una materia prima imprescindible. El coque metalúrgico (siderúrgico y de función) obtenido por tratamiento térmico de mezclas de hullas coquizables en ausencia de oxígeno a una temperatura entre 1000 y 1300 °C (proceso conocido como carbonización o coquización) es el

material de carbono utilizado en la producción de hierro fundido (Díez Díaz-Estébanez, 2013, p. 48).

En la actualidad, debido a razones técnicas, estratégicas y económicas, se utilizan mezclas homogéneas constituidas por carbones de diferente rango, composición química y petrológica, propiedades de reología y comportamiento durante el proceso para obtener un coque de la calidad requerida (Díez Díaz-Estébanez, 2013, p. 56).

Capítulo II. Las propiedades físicas de la energía

II.1. Conceptos básicos.

Un sistema se define como una región en el espacio elegida para análisis. La masa o región fuera del sistema se conoce como alrededores. La superficie real o imaginaria que separa al sistema de sus alrededores se llama frontera. La frontera de un sistema puede ser fija o móvil. Es la superficie de contacto que comparten sistema y alrededores. En términos matemáticos, la frontera tiene espesor cero y, por lo tanto, no puede contener ninguna masa ni ocupar un volumen en el espacio (Çengel & Boles, 2012, p. 10).

Un sistema cerrado, conocido también como masa de control, consta de una cantidad de masa y ninguna otra puede cruzar su frontera; pero la energía, en forma de calor o trabajo, puede cruzar la frontera. Si, como caso especial, incluso se impide que la energía cruce la frontera, entonces se trata de un sistema aislado. Un sistema abierto, o volumen de control, es una región elegida apropiadamente en el espacio, en la que tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de ese sistema (Çengel & Boles, 2012, p. 10).

Cualquier característica de los sistemas se llama propiedad y pueden ser intensivas o extensivas. Las intensivas son aquellas independientes de la masa de un sistema, como temperatura, presión y densidad. Las extensivas son aquellas cuyos valores dependen del tamaño o extensión del sistema. Las propiedades extensivas por unidad de masa se llaman propiedades específicas. Algunas propiedades son presión P , temperatura T , volumen V y masa m . La lista se puede ampliar para incluir propiedades como viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, etc. (Çengel & Boles, 2012, p. 12).

En un sistema en equilibrio todas las propiedades se pueden medir o calcular. Dicho sistema puede ser completamente descrito en un estado determinado. Todas las propiedades de un sistema tienen valores fijos y, si se cambia dicho estado, las propiedades cambian. En un equilibrio no hay

potenciales desbalanceados dentro del sistema, y éste no experimenta cambios cuando es aislado de sus alrededores (Çengel & Boles, 2012, p. 14).

Cualquier cambio de un estado de equilibrio a otro experimentado por un sistema es un proceso, y la serie de estados por los que pasa un sistema durante este proceso es una trayectoria del proceso. Para describir completamente un proceso se deben especificar sus estados inicial y final, así como la trayectoria que sigue y las interacciones con los alrededores (Çengel & Boles, 2012, p. 15).

II.2. Formas de energía.

La energía puede existir en varias formas: térmicas, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, cuya suma conforma la energía total E de un sistema. La termodinámica trata con el cambio de ésta. Así, a la energía total de un sistema se le puede asignar un valor de cero ($E = 0$) en algún punto de referencia. El cambio de energía total de un sistema es independiente del punto de referencia seleccionado (Çengel & Boles, 2012, p. 53).

En el análisis termodinámico, con frecuencia es útil considerar a la energía en sus formas macroscópica y microscópica. Las formas macroscópicas de energía son las que posee un sistema como un todo en relación con cierto marco de referencia exterior, como las energías cinética y potencial. Las formas microscópicas de energía son las que se relacionan con la estructura molecular de un sistema y el grado de la actividad molecular, y son independientes de los marcos de referencia externos. La suma de todas las formas microscópicas de energía se denomina energía interna de un sistema y se denota mediante U (Çengel & Boles, 2012, p. 53).

Las formas de energía que constituyen la energía total de un sistema pueden estar contenidas o almacenadas en éste, así que es posible considerarlas como formas estáticas de energía. Las formas de energía no almacenadas en un sistema se consideran formas dinámicas de energía, o interacciones de energía,

posibles de reconocer cuando cruzan las fronteras del sistema y representan la energía que éste gana o pierde durante un proceso (Çengel & Boles, 2012, p. 56).

Las únicas dos formas de interacción de energía relacionadas con un sistema cerrado son la transferencia de calor y el trabajo. Un volumen de control también intercambia energía vía transferencia de masa, puesto que cada vez que ésta se transfiere hacia un sistema o afuera del mismo el contenido de energía de la masa también se transfiere (Çengel & Boles, 2012, p. 56).

II.3. Transferencia de energía por calor y trabajo.

El calor se define como la forma de energía que se trasfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura. Es decir, una interacción de energía será calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura (Çengel & Boles, 2012, p. 60).

Como forma de energía, el calor tiene unidades de energía, la más común es el kJ. La cantidad de calor transferida durante el proceso entre dos estados (1 y 2) se denota mediante Q_{12} o sólo Q . La transferencia de calor de un sistema por unidad de masa m se denota como q y se determina a partir de (Çengel & Boles, 2012, p. 61):

$$q = \frac{Q}{m} \quad (kJ/kg)$$

En ocasiones es deseable conocer la velocidad de transferencia de calor (cantidad de calor transferida por unidad de tiempo) en lugar del calor total transferido durante cierto intervalo de tiempo. La velocidad de transferencia de calor se expresa con \dot{Q} , donde el punto significa la derivada con respecto al tiempo. La tasa de transferencia de calor \dot{Q} tiene las unidades kJ/s, equivalente a kW (Çengel & Boles, 2012, p. 61).

El trabajo es la transferencia de energía relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia y tiene unidades de energía, como kJ . Un pistón ascendente, un eje giratorio y un cable eléctrico que cruzan las fronteras del sistema son situaciones que se relacionan con interacciones de trabajo. El trabajo es también una forma de energía transferida como calor y, por lo tanto, tiene unidades de energía como kJ . El trabajo por unidad de masa de un sistema se denota mediante w y se expresa como

$$w = \frac{W}{m} \quad (kJ/kg)$$

El trabajo realizado por unidad de tiempo se llama potencia y se denota como \dot{W} . Las unidades de potencia son kJ/s , o kW (Çengel & Boles, 2012, p. 62).

El calor y el trabajo son mecanismos de transferencia de energía entre un sistema y el exterior, y existen muchas similitudes entre ellos (Çengel & Boles, 2012, p. 63):

- Tanto el calor como el trabajo pueden ser reconocidos en las fronteras de un sistema cuando las cruzan; es decir, son fenómenos de frontera.
- Ambos se relacionan con un proceso, no con un estado. A diferencia de las propiedades, ni el calor ni el trabajo tienen un significado en un estado.
- Ambos son función de la trayectoria (es decir, sus magnitudes dependen de la trayectoria seguida durante el proceso, así como de los estados iniciales y finales).

Las funciones de la trayectoria son diferenciales inexactas que se denotan por el símbolo δ (Çengel & Boles, 2012, pp. 63-64). Así, una cantidad diferencial de calor o trabajo se representa mediante δQ o δW , respectivamente, en lugar de dQ o dW . En cambio, las propiedades son funciones de estado y son diferenciales exactas designadas por el símbolo d . Un pequeño cambio de volumen, por ejemplo, se representa por dV , y el cambio de volumen durante el proceso entre los estados 1 y 2 es

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 = \Delta V$$

Sin embargo, el trabajo total realizado entre los procesos 1 y 2 es

$$\int_1^2 \delta W = W_{12} \quad (\text{no } \Delta W)$$

Hay diversas formas de hacer trabajo, cada una relacionada de cierta manera con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia. En la mecánica, el trabajo que realiza una fuerza constante \mathcal{F} sobre un cuerpo que se desplaza una distancia s en la dirección de la fuerza se expresa como

$$W = \mathcal{F}s \quad (kJ)$$

Si la fuerza \mathcal{F} no es constante, el trabajo realizado se obtiene al integrar las cantidades diferenciales de trabajo, para la cual es necesario saber cómo varía la fuerza con el desplazamiento (Çengel & Boles, 2012, p. 66).

$$W = \int_1^2 \mathcal{F}ds \quad (kJ)$$

Hay dos requisitos para que se presente una interacción de trabajo entre un sistema y el exterior:

- Debe haber una fuerza que actúe sobre los límites.
- Éstos deben moverse.

Por lo tanto, la presencia de fuerzas en la frontera sin ningún desplazamiento de la misma no constituye una interacción de trabajo. De modo similar, el desplazamiento de la frontera sin ninguna fuerza que se oponga a este movimiento o impulso (como la expansión de un gas al interior de un espacio al vacío) no es una interacción de trabajo ya que no transfiere energía (Çengel & Boles, 2012, p. 66).

En muchos problemas termodinámicos, el trabajo mecánico es la única forma de trabajo y se relaciona con el movimiento de la frontera de un sistema o el del propio sistema como un todo. El trabajo de flecha, que es la transmisión de

energía mediante un eje rotatorio, es una forma común de trabajo mecánico. El cambio de la longitud de un resorte bajo la influencia de una fuerza, o el trabajo de resorte, y el modelado de sólidos como si fuesen resortes lineales que se contraen y alargan bajo la acción de una fuerza, o el trabajo sobre barras sólidas elásticas, son otras formas de trabajo mecánico (Çengel & Boles, 2012, pp. 66-67).

Los trabajos de tensión superficial, eléctrico, magnético y de polarización eléctrica, y las energías cinética y potencial también representan ejemplos de trabajo mecánico (Çengel & Boles, 2012, pp. 69-70).

II.4. Transferencia de energía por flujo másico.

Los volúmenes de control en general están relacionados con el flujo de un fluido durante largos periodos, y se puede expresar como velocidad de energía asociado al flujo de un fluido (Çengel & Boles, 2012, p. 54). Esto se consigue al incorporar el flujo másico \dot{m} , que es la cantidad de masa que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo; y se relaciona con el flujo volumétrico \dot{V} , definido como el volumen de un fluido que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo, mediante

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \rho A_t V_{prom} \quad (kg/s)$$

donde ρ es la densidad del fluido, A_t el área de sección transversal del flujo y V_{prom} es la velocidad media del flujo normal a A_t (véase ilustración 1). El flujo de energía asociado con un fluido que fluye a una tasa de \dot{m} es

$$\dot{E} = \dot{m}e \quad (kJ/s \text{ ó } kW)$$

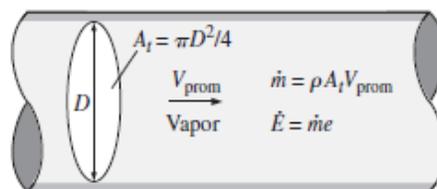


Ilustración 1. Tasas de flujo de masa y energía asociadas a un flujo de vapor en una tubería.
Fuente: (Çengel & Boles, 2012, p. 54).

lo que es análogo a $E = me$, donde e es la energía total específica del fluido.

A diferencia de los sistemas cerrados, en los volúmenes de control hay flujo de masa a través de sus fronteras, y se requiere trabajo para introducirla o sacarla del volumen de control. Este trabajo se conoce como trabajo de flujo o energía de flujo, y se requiere para mantener un flujo continuo a través de un volumen de control (Çengel & Boles, 2012, p. 226).

A fin de obtener una relación para el trabajo de flujo, considere un elemento de fluido de volumen \mathcal{V} como el de la ilustración 2. El fluido corriente arriba fuerza inmediatamente a este elemento de fluido a entrar al volumen de control; por lo tanto, se puede considerar como un émbolo imaginario. Es posible elegir el elemento del fluido lo suficientemente pequeño para que tenga propiedades uniformes en todas partes (Çengel & Boles, 2012, p. 226).

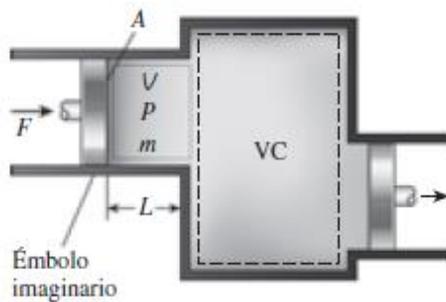


Ilustración 2. Esquema para trabajo de flujo.
Fuente: (Çengel & Boles, 2012, p. 226).

Si la presión del fluido es \mathbb{P} y el área de la sección transversal del elemento de fluido es \mathcal{A} , la fuerza que aplica el émbolo imaginario sobre el elemento de fluido es

$$\mathcal{F} = \mathbb{P}\mathcal{A}$$

Para empujar todo el elemento de fluido del volumen de control, esta fuerza debe actuar a lo largo de una distancia \mathcal{L} . Así, el trabajo realizado al empujar el elemento de fluido por la frontera (es decir, trabajo de flujo) es

$$W_{flujo} = \mathcal{F}\mathcal{L} = \mathbb{P}\mathcal{A}\mathcal{L} = \mathbb{P}\mathcal{V} \quad (kJ)$$

El trabajo de flujo por unidad de masa se obtiene al dividir ambos lados de esta ecuación entre la masa del elemento de fluido:

$$w_{flujo} = \mathbb{P}v \quad (kJ/kg)$$

La relación del trabajo de flujo es la misma si se empuja hacia dentro o hacia fuera del volumen de control (Çengel & Boles, 2012, pp. 266-227).

La energía total de un sistema compresible simple consiste en tres partes: energías internas, cinética y potencial. Por unidad de masa, ésta se expresa como

$$e = u + ec + ep = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad (kJ/kg)$$

donde v es la velocidad y z es la elevación del sistema en relación con algún punto de referencia (Çengel & Boles, 2012, p. 227).

El fluido que entra o sale de un volumen de control posee una forma adicional de energía, la energía de flujo $\mathbb{P}v$; entonces, la energía total de un fluido en movimiento por unidad de masa (denotada por θ) es

$$\theta = \mathbb{P}v + e = \mathbb{P}v + (u + ec + ep)$$

Por definición, la entalpía es $h \equiv \mathbb{P}v + u$. Por lo que (Çengel & Boles, 2012, p. 228):

$$\theta = h + ec + ep = h + \frac{v^2}{2} + gz \quad (kJ/kg)$$

Si, en lugar de la energía interna, se usa la entalpía para representar la energía de un fluido en movimiento, ya no es necesario preocuparse por el trabajo de flujo. La energía relacionada con meter o sacar el fluido del volumen de control se toma en cuenta de modo automático en la entalpía. Ésta es la principal razón para definir esta propiedad (Çengel & Boles, 2012, p. 228).

Como θ es la energía total por unidad de masa, la energía total de un fluido en movimiento de masa m es simplemente $m\theta$, siempre y cuando las propiedades de la masa m sean uniformes. También, cuando una corriente de fluido con propiedades uniformes se mueve a un flujo másico de \dot{m} , la tasa de flujo

de energía con esa corriente es $\dot{m}\theta$. Es decir, la cantidad de energía transportada es

$$E_{masa} = m\theta = m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (kJ)$$

Y la tasa de energía transportada es

$$\dot{E}_{masa} = \dot{m}\theta = \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (kW)$$

Cuando las energías cinética y potencial de una corriente de fluido son insignificantes, estas relaciones se simplifican a $E_{masa} = mh$ y $\dot{E}_{masa} = \dot{m}h$ (Çengel & Boles, 2012, p. 228).

II.5. La primera ley de la termodinámica.

La primera ley, conocida también como el principio de la conservación de la energía, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma. Por lo tanto, cada cantidad de energía por pequeña que sea debe justificarse durante un proceso (Çengel & Boles, 2012, p. 70).

La primera ley no hace referencia al valor de la energía total de un sistema cerrado en un estado, tan sólo establece que el cambio de energía total durante un proceso adiabático debe ser igual al trabajo neto realizado. En consecuencia, se puede asignar cualquier valor arbitrario conveniente a la energía total en un estado determinado para servir como punto de referencia (Çengel & Boles, 2012, pp. 70-71).

El principio de conservación de la energía se expresa como: el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. Es decir,

$$\left(\begin{array}{l} \text{Energía total que} \\ \text{entra al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Energía total que} \\ \text{sale del sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Cambio en la energía} \\ \text{total del sistema} \end{array} \right)$$

ó

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

con

$$\Delta E_{\text{sistema}} = (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) + (W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}}) + (E_{\text{masa,entrada}} - E_{\text{masa,salida}})$$

Esta relación es más conocida como balance de energía y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso (Çengel & Boles, 2012, pp. 71-72).

Eficiencia es uno de los términos más usados en termodinámica, e indica qué tan bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía. Asimismo, este término resulta uno de los que en general son mal usados en termodinámica, además de ser una fuente de malas interpretaciones; esto se debe a que se usa sin una definición adecuada. El desempeño o eficiencia se expresa en términos de la salida deseada y la entrada requerida de la siguiente manera (Çengel & Boles, 2012, p. 78):

$$\text{Desempeño} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}}$$

II.6. La segunda ley de la termodinámica.

La segunda ley de la termodinámica se usa para determinar los límites teóricos en el desempeño de sistemas de conversión de energía de uso ordinario, como máquinas térmicas y refrigeradores, así como predecir el grado de las reacciones químicas. La segunda ley está también estrechamente asociada con el concepto de perfección. De hecho, la segunda ley define la perfección para los procesos termodinámicos. Se puede usar para cuantificar el nivel de perfección de un proceso y señalar la dirección para eliminar eficazmente las imperfecciones (Çengel & Boles, 2012, p. 281).

En el desarrollo de la segunda ley de la termodinámica, es muy conveniente tener un cuerpo hipotético que posea una capacidad de energía térmica relativamente grande que pueda suministrar o absorber cantidades infinitas de calor sin experimentar ningún cambio de temperatura. Tal cuerpo se llama depósito de energía térmica, o sólo depósito. En la práctica, los grandes cuerpos de agua, como océanos, lagos y ríos, así como el aire atmosférico, se pueden modelar de manera precisa como depósitos de energía térmica debido a sus grandes capacidades de almacenaje de energía o masa térmicas (Çengel & Boles, 2012, p. 281).

Un depósito que suministra energía en la forma de calor se llama fuente, y otro que absorbe energía en la forma de calor se llama sumidero. Los depósitos de energía térmica suelen denominarse depósitos de calor porque proveen o absorben energía en forma de calor (Çengel & Boles, 2012, p. 281).

El trabajo se puede convertir en calor de manera directa y por completo, pero convertir el calor en trabajo requiere usar algunos dispositivos especiales. Estos dispositivos se llaman máquinas térmicas (Çengel & Boles, 2012, p. 282).

Las características de las máquinas térmicas son (Çengel & Boles, 2012, p. 282):

- Reciben calor de una fuente a temperatura alta (energía solar, horno de petróleo, reactor nuclear, etc.).
- Convierten parte de este calor en trabajo (por lo general en la forma de una flecha rotatoria).
- Rechazan el calor de desecho hacia un sumidero de calor de baja temperatura (la atmósfera, los ríos, etcétera).
- Operan en un ciclo, que es un sistema que regresa a su estado inicial al final del proceso (para un ciclo los estados inicial y final son idénticos).

Las máquinas térmicas y otros dispositivos cíclicos por lo común requieren un fluido hacia y desde el cual se transfiere calor mientras experimenta un ciclo. Al fluido se le conoce como fluido de trabajo (Çengel & Boles, 2012, p. 282).

II.7. Procesos reversibles e irreversibles.

Un proceso reversible se define como un proceso que se puede invertir sin dejar ningún rastro en los alrededores. Es decir, tanto el sistema como los alrededores vuelven a sus estados iniciales una vez finalizado el proceso inverso. Esto es posible sólo si el intercambio de calor y trabajo netos entre el sistema y los alrededores es cero para el proceso combinado (original e inverso). Los procesos que no son reversibles se denominan procesos irreversibles (Çengel & Boles, 2012, p. 296).

Se debe señalar que es posible volver a un sistema a su estado original siguiendo un proceso, sin importar si éste es reversible o irreversible. Pero para procesos reversibles, esta restauración se hace sin dejar ningún cambio neto en los alrededores, mientras que para procesos irreversibles los alrededores normalmente hacen algún trabajo sobre el sistema, por lo tanto no vuelven a su estado original (Çengel & Boles, 2012, p. 296).

El concepto de proceso reversible conduce a la definición de eficiencia según la segunda ley para procesos reales, que es el grado de aproximación al proceso reversible correspondiente. Esto permite comparar el desempeño de diferentes dispositivos diseñados para hacer la misma tarea con base en sus eficiencias. Mientras mejor sea el diseño, menores son las irreversibilidades y mayor es la eficacia según la segunda ley (Çengel & Boles, 2012, p. 297).

Los factores que causan que un proceso sea irreversible se llaman irreversibilidades. La fricción es una forma familiar de irreversibilidad relacionada con cuerpos en movimiento. Cuando dos cuerpos en contacto son forzados a moverse uno respecto al otro, en la interfase de ambos se desarrolla una fuerza de fricción que se opone al movimiento, por lo que se requiere algo de trabajo para vencer esta fuerza de fricción. La energía suministrada como trabajo se convierte finalmente en calor durante el proceso y se transfiere hacia los cuerpos en contacto, como lo evidencia un aumento de temperatura en la interfase (Çengel & Boles, 2012, p. 297).

Cuando se invierte la dirección del movimiento, los cuerpos se restablecen a su posición original, pero la interfase no se enfría y el calor no se convierte de nuevo en trabajo. En cambio, algo más del trabajo se convierte en calor mientras se vencen las fuerzas de fricción que también se oponen al movimiento inverso. Dado que el sistema y los alrededores no pueden ser regresados a sus estados originales, este proceso es irreversible. Mientras más grandes sean las fuerzas de fricción, más irreversible es el proceso (Çengel & Boles, 2012, p. 297).

Otro ejemplo de irreversibilidad es la expansión libre de un gas, el cual se halla separado de un vacío mediante una membrana. Cuando se rompe la membrana, el gas llena todo el recipiente y la única forma de restaurar el sistema a su estado original es comprimirlo a su volumen inicial, transfiriendo calor del gas hasta que alcance su temperatura inicial. La cantidad de calor transferida del gas es igual a la cantidad de trabajo que los alrededores realizan sobre el gas. La restauración de los alrededores requiere convertir por completo este calor en trabajo, lo cual violaría la segunda ley. Por lo tanto, la expansión libre de un gas es un proceso irreversible (Çengel & Boles, 2012, p. 298).

Una tercera forma de irreversibilidad conocida es la transferencia de calor debida a una diferencia finita de temperatura. Considere una lata de bebida carbonatada fría dejada en un espacio caliente. El calor se transfiere desde el aire de la habitación el cual se encuentra a mayor temperatura hacia la lata que está más fría. La única forma de invertir este proceso y restablecer la temperatura original de la lata de soda es proporcionarle refrigeración, lo cual requiere algo de entrada de trabajo. Al final del proceso inverso, la soda vuelve a su estado original, pero no los alrededores (Çengel & Boles, 2012, p. 298).

En este último ejemplo, la energía interna de los alrededores se incrementa en una cantidad igual en magnitud al trabajo suministrado al refrigerador. Restablecer los alrededores a su estado inicial sólo es posible si se convierte este exceso de energía interna completamente en trabajo, lo cual es imposible sin violar la segunda ley. Como solamente el sistema, en el sistema y los alrededores, puede ser restablecido a su condición inicial, la transferencia de calor ocasionada

por una diferencia de temperatura es un proceso irreversible. El mezclado de dos fluidos, la resistencia eléctrica, la deformación inelástica de sólidos y las reacciones químicas son otros ejemplos de irreversibilidades (Çengel & Boles, 2012, p. 298).

Un proceso se denomina internamente reversible si no ocurren irreversibilidades dentro de las fronteras del sistema durante el proceso; externamente reversible, si no ocurren irreversibilidades fuera de las fronteras del sistema durante el proceso; totalmente reversible, o nada más reversible, si no tiene irreversibilidades dentro del sistema o sus alrededores (Çengel & Boles, 2012, pp. 298-299).

II.8. La máquina térmica de Carnot.

El ciclo reversible ideal más conocido fue propuesto en 1824 por el ingeniero francés Sadi Carnot (Çengel & Boles, 2012, pp. 300-303). La máquina térmica teórica que opera en el ciclo de Carnot se llama máquina térmica de Carnot, cuyo ciclo se compone de cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos (a temperatura constante) y dos adiabáticos (Çengel & Boles, 2012, p. 300).

La eficiencia térmica de cualquier máquina térmica, reversible o irreversible, se determina como

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

donde Q_H es el calor transferido hacia la máquina térmica desde un depósito a temperatura alta T_H , y Q_L es el calor rechazado hacia un depósito de temperatura baja T_L . Para máquinas térmicas reversibles, la relación de transferencia de calor en la relación anterior se puede reemplazar por la de temperaturas absolutas de los dos depósitos. Entonces la eficiencia de una máquina de Carnot, o de cualquier máquina térmica reversible, se convierte en (Çengel & Boles, 2012, p. 305):

$$\eta_{ter,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Esta relación se denomina eficiencia de Carnot. Ésta es la eficiencia máxima que puede tener una máquina térmica que opera entre los dos depósitos de energía térmica a temperaturas T_L y T_H . Todas las máquinas térmicas irreversibles (es decir, reales) que operan entre estos límites de temperatura (T_L y T_H) tienen eficiencias menores. Una máquina térmica real no puede alcanzar esta máxima eficiencia teórica porque es imposible eliminar por completo las irreversibilidades relacionadas con el ciclo real (Çengel & Boles, 2012, p. 305).

Las eficiencias térmicas de las máquinas térmicas reales y reversibles que operan entre los mismos límites de temperatura se comparan (Çengel & Boles, 2012, p. 305):

$$\eta_{ter} \begin{cases} < \eta_{ter,rev} & \text{máquina térmica irreversible} \\ = \eta_{ter,rev} & \text{máquina térmica reversible} \\ > \eta_{ter,rev} & \text{máquina térmica imposible} \end{cases}$$

La mayor parte de los dispositivos que producen trabajo (máquinas térmicas) utilizados en la actualidad tienen eficiencias menores a 40 por ciento, lo cual parece bajo en comparación con el 100 por ciento. Sin embargo, cuando se evalúa el desempeño de las máquinas térmicas reales, las eficiencias no deben compararse con el 100 por ciento, sino con la eficiencia de una máquina térmica reversible que opera entre los mismos límites de temperatura, porque éste es el límite superior teórico para la eficiencia, no el 100 por ciento (Çengel & Boles, 2012, p. 305).

La eficiencia de una máquina térmica de Carnot se incrementa cuando T_H aumenta o cuando T_L disminuye. Esto era de esperarse porque cuando T_L disminuye pasa lo mismo con la cantidad de calor rechazado; así, cuando T_L se aproxima a cero la eficiencia del ciclo de Carnot tiende a la unidad (Çengel & Boles, 2012, p. 305).

II.9. Entropía.

La entropía puede verse como una medida de desorden molecular, o aleatoriedad molecular. Cuando un sistema se vuelve más desordenado, las posiciones de las moléculas son menos predecibles y la entropía aumenta. En fase sólida, las moléculas de una sustancia oscilan continuamente en sus posiciones de equilibrio, pero les es imposible moverse unas respecto de las otras, por lo que su posición puede predecirse en cualquier momento con certeza. Sin embargo, en la fase gaseosa, las moléculas se mueven al azar, chocan entre sí y cambian de dirección, lo cual hace sumamente difícil predecir con precisión el estado microscópico de un sistema en cualquier instante. Asociado a este caos molecular se encuentra un valor alto de entropía (Çengel & Boles, 2012, p. 346).

Desde un punto de vista microscópico, un sistema aislado que parece estar en equilibrio puede exhibir un nivel alto de actividad debido al movimiento incesante de las moléculas. A cada estado de equilibrio macroscópico corresponde un gran número de posibles estados microscópicos o configuraciones moleculares; entonces la entropía de un sistema se relaciona con el número total de esos estados posibles de ese sistema y es llamada probabilidad termodinámica p , que se expresa por la relación de Boltzmann como

$$S = k \ln p$$

donde $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ es la constante de Boltzmann. El desorden molecular de un sistema aislado aumenta siempre que experimenta un proceso (Çengel & Boles, 2012, pp. 346-347).

Las oscilaciones moleculares se desvanecen cuando la temperatura disminuye y las moléculas se inmovilizan al cero absoluto, lo que representa un estado de orden molecular último, y energía mínima. Por lo tanto, la entropía de una sustancia pura cristalina a una temperatura absoluta de cero es cero, puesto que no hay incertidumbre sobre el estado de las moléculas con respecto a ese momento. Esta declaración es conocida como la tercera ley de la termodinámica, la cual proporciona un punto de referencia absoluto para la determinación de

entropía. La entropía determinada como relativa con respecto a este punto se llama entropía absoluta (Çengel & Boles, 2012, p. 347).

La cantidad de energía siempre se conserva durante un proceso real (primera ley), pero la calidad está destinada a disminuir (segunda ley). Esta disminución en la calidad siempre está acompañada por un incremento en la entropía. Por ejemplo, considere la transferencia de 10 kJ de energía como calor de un medio caliente a otro frío; al final del proceso aún se tendrán los 10 kJ de energía, pero a una temperatura más baja y, por lo tanto, a una menor calidad. Se puede concluir entonces que el proceso sólo puede ocurrir en la dirección del aumento de entropía global o desorden molecular (Çengel & Boles, 2012, p. 348).

La entropía fue estudiada en 1865 por el físico alemán R. J. E. Clausius (1822-1888), cuando analizaba el comportamiento de un sistema conectado a un depósito de energía térmica con una temperatura constante a través de un dispositivo cilíndrico en condiciones reversibles, y de ésta derivó la siguiente desigualdad (Çengel & Boles, 2012, p. 332):

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

La integral cíclica de $\delta Q/T$ siempre será menor o igual a cero. Esta desigualdad, de hecho, es válida durante todos los ciclos, tanto reversibles como irreversibles. El símbolo \oint se usa para indicar que la integración será realizada durante el ciclo entero. Cualquier transferencia de calor hacia o desde un sistema consiste en cantidades diferenciales de transferencia de calor. Entonces la integral cíclica de $\delta Q/T$ puede considerarse como la suma de todas estas cantidades diferenciales de transferencia de calor dividida entre la temperatura en la frontera (Çengel & Boles, 2012, p. 332).

Si ninguna irreversibilidad ocurre tanto dentro del sistema como en el depósito cilíndrico reversible, entonces el ciclo experimentado por el sistema combinado es internamente reversible y como tal, puede revertirse. Para ciclos internamente reversibles

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int,rev} = 0$$

De ahí se concluye que la igualdad en la desigualdad de Clausius se cumple para los ciclos reversibles total o sólo internamente reversibles, mientras que la desigualdad se mantiene para los irreversibles (Çengel & Boles, 2012, p. 333).

Una cantidad cuya integral cíclica es cero depende sólo del estado y no de la trayectoria del proceso; por lo tanto es una propiedad. En consecuencia, la cantidad $(\delta Q/T)_{int,rev}$ debe representar una propiedad en la forma diferencial. De esta manera, Clausius definió a la entropía S como (Çengel & Boles, 2012, p. 333):

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int,rev} \quad (kJ/K)$$

El cambio de entropía de un sistema durante un proceso puede determinarse integrando la última ecuación entre los estados inicial y final:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int,rev} \quad (kJ/K)$$

La entropía es una propiedad y, al igual que las otras propiedades, tiene valores fijos en estados fijos. Por consiguiente, el cambio de entropía ΔS entre dos estados especificados es el mismo sin importar qué trayectoria, reversible o irreversible, se sigue durante un proceso (Çengel & Boles, 2012, p. 334).

También es importante observar que la integral $\delta Q/T$ da el valor de cambio de entropía sólo si la integración se efectúa a lo largo de una trayectoria internamente reversible entre los dos estados. La integral de $\delta Q/T$ a lo largo de una trayectoria irreversible no es una propiedad y, generalmente, se obtendrían valores diferentes cuando la integración se cumple a lo largo de distintas trayectoria irreversibles. Por lo tanto, incluso para los procesos irreversibles, el cambio de entropía debe determinarse cumpliendo esta integración a lo largo de alguna trayectoria internamente reversible conveniente e imaginaria entre los estados especificados (Çengel & Boles, 2012, p. 334).

II.10. Principio de incremento de entropía: generación de entropía.

Considere un ciclo conformado por dos procesos: el proceso 1-2 que es arbitrario (reversible o irreversible), y el 2-1 el cual es internamente reversible (Çengel & Boles, 2012, pp. 335-336). De la desigualdad de Clausius,

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

o

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int,rev} \leq 0$$

La segunda integral en la relación anterior es reconocida como el cambio de entropía $S_1 - S_2$ (Çengel & Boles, 2012, p. 336). Por consiguiente,

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_1 - S_2 \leq 0$$

la cual puede reordenarse como

$$S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

También puede expresarse en forma diferencial como

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

Donde la igualdad se cumple para un proceso internamente reversible y la desigualdad para uno irreversible. De estas ecuaciones se puede concluir que el cambio de entropía de un sistema cerrado durante un proceso irreversible es mayor que la integral de $\delta Q/T$ evaluada para ese proceso. En el caso límite de un proceso reversible, estos dos cantidades se vuelven iguales. Es necesario enfatizar que en estas relaciones T es la temperatura termodinámica de la frontera a través de la cual el calor diferencial δQ se transfiere entre el sistema y los alrededores (Çengel & Boles, 2012, p. 336).

La cantidad $\Delta S = S_2 - S_1$ representa el cambio de entropía del sistema. Para un proceso reversible, se vuelve igual a $\int_1^2 \delta Q/T$, que representa la transferencia de entropía por medio de calor (Çengel & Boles, 2012, p. 336).

El signo de la desigualdad en las relaciones precedentes es un constante recordatorio de que el cambio de entropía de un sistema cerrado durante un proceso irreversible siempre es mayor que la transferencia de entropía. Es decir, alguna entropía es generada o creada durante un proceso irreversible, y esta generación se debe completamente a la presencia de irreversibilidades. La entropía generada durante un proceso se llama generación de entropía y se denota por S_{gen} . Como la diferencia entre el cambio de entropía de un sistema cerrado y la transferencia de entropía es igual a la generación de entropía, la penúltima ecuación puede volver a escribirse como una igualdad (Çengel & Boles, 2012, p. 336):

$$\Delta S_{sis} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$$

Obsérvese que la generación de entropía S_{gen} siempre es una cantidad positiva o cero. Su valor depende del proceso, así que no es una propiedad del sistema. También, en la ausencia de cualquier transferencia de entropía, el cambio de entropía de un sistema es igual a la generación de entropía (Çengel & Boles, 2012, p. 336).

La ecuación anterior tiene implicaciones a largo alcance en termodinámica. Para un sistema aislado (o simplemente un sistema cerrado adiabático), la transferencia de calor es cero, por lo que

$$\Delta S_{aislado} \geq 0$$

Esta ecuación expresa que la entropía de un sistema aislado durante un proceso siempre se incrementa o, en el caso límite de un proceso reversible, permanece constante. En otros términos, nunca disminuye. Esto es conocido como el principio de incremento de entropía. Note que en la ausencia de cualquier transferencia de

calor, el cambio de entropía solamente se debe a las irreversibilidades y su efecto es siempre incrementar la entropía (Çengel & Boles, 2012, p. 336).

La entropía es una propiedad extensiva, por lo tanto la entropía total de un sistema es igual a la suma de las entropías de las partes del sistema. Un sistema asilado puede estar compuesto de cualquier número de subsistemas. Por ejemplo, un sistema y sus alrededores constituyen un sistema asilado porque los dos pueden hallarse encerrados por una frontera arbitraria suficientemente grande a través de la cual no hay transferencia de calor, trabajo o masa. Por consiguiente, es posible considerar a un sistema y sus alrededores como dos subsistemas de un sistema aislado, y el cambio de entropía de éste durante un proceso resulta de la suma de los cambios de entropía del sistema y sus alrededores, la cual es igual a la generación de entropía porque un sistema aislado no involucra transferencia de entropía. Es decir,

$$S_{generada} = \Delta S_{total} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores} \geq 0$$

donde la igualdad se cumple para los procesos reversibles y la desigualdad para los irreversibles. Se observa que $\Delta S_{alrededores}$ designa el cambio en entropía de los alrededores como resultado de la ocurrencia del proceso bajo consideración (Çengel & Boles, 2012, p. 337).

El principio de incremento de entropía no implica que la de un sistema no pueda disminuir. El cambio de entropía de un sistema puede ser negativo durante un proceso, pero la generación de entropía no. El principio de incremento de entropía puede resumirse como sigue:

$$S_{gen} \begin{cases} > 0 & \text{proceso irreversible} \\ = 0 & \text{proceso reversible} \\ < 0 & \text{proceso imposible} \end{cases}$$

Esta relación sirve como un criterio decisivo si un proceso es reversible, irreversible o imposible (Çengel & Boles, 2012, p. 337).

Las cosas en la naturaleza tienden a cambiar hasta que logran un estado de equilibrio. El principio de incremento de entropía dicta que la entropía de un sistema aislado aumenta hasta que su entropía alcanza un valor máximo. Se dice

que el sistema ha alcanzado un estado de equilibrio porque el principio de incremento de entropía en ese punto prohíbe al sistema sufrir cualquier cambio de estado que produzca una disminución en la entropía (Çengel & Boles, 2012, p. 337).

Los procesos sólo pueden ocurrir en una cierta dirección, no en cualquiera. Un proceso debe proceder en la dirección que obedece al principio de incremento de entropía, es decir, $S_{gen} \geq 0$. Un proceso que viola este proceso es imposible (Çengel & Boles, 2012, pp. 337-338).

La entropía es una propiedad que no se conserva, por lo tanto no existe algo como el principio de conservación de la entropía. Ésta se conserva sólo durante el proceso reversible idealizado y se incrementa durante todos los procesos reales (Çengel & Boles, 2012, p. 338).

El desempeño de los sistemas de ingeniería es degradado por la presencia de irreversibilidades; y la generación de entropía es una medida de las magnitudes de irreversibilidades presentes durante ese proceso. A mayor magnitud de irreversibilidades, mayor generación de entropía. Por consiguiente, la generación de entropía puede usarse como una medida cuantitativa de irreversibilidades asociadas al proceso, y para establecer el criterio a emplearse en el diseño de dispositivos (Çengel & Boles, 2012, p. 338).

II.11. Las ecuaciones $T ds$.

La cantidad $(\delta Q/T)_{int rev}$ corresponde a un cambio diferencial en la propiedad entropía. Entonces, el cambio para un proceso puede evaluarse integrando $\delta Q/T$ a lo largo de alguna trayectoria imaginaria internamente reversible entre los estados extremos reales. Para los procesos isotérmicos internamente reversibles, esta integración es directa, pero cuando la temperatura varía durante el proceso, se necesita una relación entre δQ y T para llevar a cabo esta integración (Çengel & Boles, 2012, p. 350).

La forma diferencial de la ecuación de conservación de la energía para un sistema cerrado (una masa fija) sin cambios en energía cinética y potencial y que contiene una sustancia simple compresible, puede extenderse para un proceso internamente reversible como

$$\delta Q_{int rev} - \delta W_{int rev, salida} = dU$$

Pero

$$\delta Q_{int rev} = T dS$$

$$\delta W_{int rev, salida} = \mathbb{P} d\mathcal{V}$$

Por lo tanto,

$$T dS = dU + \mathbb{P} d\mathcal{V} \quad (kJ)$$

o

$$T ds = du + \mathbb{P} dv \quad (kJ/kg)$$

Esta ecuación es conocida como la primera ecuación $T ds$, o de Gibbs. Note que el único tipo de interacción de trabajo que un sistema simple compresible puede involucrar cuando es sometido a un proceso internamente reversible es el trabajo de frontera (Çengel & Boles, 2012, p. 350).

La segunda ecuación $T ds$ se obtiene al eliminar du de la ecuación anterior usando la definición de entalpía ($h = u + \mathbb{P}v$):

$$h = u + \mathbb{P}v \Rightarrow dh = du + \mathbb{P} dv + v d\mathbb{P}$$

$$T ds = dh - v d\mathbb{P}$$

Las relaciones $T ds$ son sumamente valiosas porque relacionan cambios de entropía de un sistema con cambios en otras propiedades; son relaciones de propiedades y son independientes respecto al tipo de procesos (Çengel & Boles, 2012, p. 350).

El cambio de entropía de un sistema durante un proceso es mayor a la transferencia de entropía en una cantidad igual a la entropía generada durante el

proceso dentro del sistema; entonces el principio de incremento de entropía para cualquier sistema se expresa como

$$\left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{total de} \\ \text{entrada} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{total de} \\ \text{salida} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{total} \\ \text{generada} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{entropía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right)$$

o

$$S_{\text{entrada}} - S_{\text{salida}} + S_{\text{generada}} = \Delta S_{\text{sistema}}$$

Esta relación a menudo se nombra como el balance de entropía y es aplicable a cualquier sistema que experimenta cualquier proceso. La anterior relación de balance de entropía puede enunciarse como: el cambio de entropía de un sistema durante un proceso es igual a la transferencia de entropía neta a través de la frontera del sistema y la entropía generada dentro de éste (Çengel & Boles, 2012, p. 377).

II.12. Exergía.

El potencial de trabajo de la energía contenida en un sistema en un estado especificado es el trabajo útil máximo que puede obtenerse del sistema (Çengel & Boles, 2012, p. 428). Recordemos que el trabajo realizado durante un proceso depende de los estados inicial y final de la trayectoria del proceso. Es decir (Çengel & Boles, 2012, p. 428):

$$\text{Trabajo} = F(\text{estado inicial, trayectoria del proceso, estado final})$$

En un análisis de exergía se especifica el estado inicial, por lo tanto no es una variable. La salida de trabajo se maximiza cuando el proceso entre dos estados especificados se ejecuta de una manera reversible. Por consiguiente, determinado el trabajo potencial todas las irreversibilidades se desprecian. Por último, el sistema debe estar en el estado muerto al final del proceso para maximizar la salida de trabajo (Çengel & Boles, 2012, p. 428).

Se afirma que un sistema está en el estado muerto cuando se encuentra en equilibrio termodinámico con el ambiente. En ese estado, un sistema está a la

temperatura y a la presión de su ambiente (en equilibrio térmico y mecánico), no tiene energía cinética o potencial relativa a su ambiente (velocidad cero y elevación cero por arriba del nivel de referencia) y no reacciona con el ambiente (químicamente inerte). Tampoco hay efectos de desequilibrio magnético, eléctrico y tensión superficial entre el sistema y sus alrededores, si éstos son relevantes para la situación específica. Las propiedades de un sistema en el estado muerto se denotan mediante el subíndice cero, por ejemplo, \mathbb{P}_0 , T_0 , h_0 , u_0 y s_0 . A menos que se especifique de otra manera, la temperatura y la presión del estado muerto se suponen como $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ($77\text{ }^\circ\text{F}$) y $\mathbb{P}_0 = 1\text{ atm}$ (101.325 kPa ó 14.7 psia). Un sistema tiene exergía cero en el estado muerto (Çengel & Boles, 2012, p. 428).

Se debe diferenciar entre alrededores, alrededores inmediatos y ambiente. Por definición, los alrededores son todo lo que está afuera de las fronteras del sistema; los alrededores inmediatos corresponden a la porción de los alrededores que son afectados por el proceso, y el ambiente es la región que se halla más allá de los alrededores inmediatos cuyas propiedades en cualquier punto no son afectadas por el proceso. Por consiguiente, cualquier irreversibilidad durante un proceso ocurre dentro del sistema y sus alrededores inmediatos, mientras que el ambiente está libre de cualquier irreversibilidad (Çengel & Boles, 2012, p. 428).

Un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado inicial especificado al estado de su ambiente, es decir, el estado muerto. Esto representa el potencial de trabajo útil del sistema en el estado especificado y se llama exergía. Es importante comprender que la exergía no representa la cantidad de trabajo que un dispositivo productor realmente entregará después de la instalación; sino que representa el límite superior en la cantidad de trabajo que un dispositivo podría entregar sin violar cualquier ley termodinámica. Habrá siempre una diferencia, grande o pequeña, entre la exergía y el trabajo real entregado por un dispositivo, diferencia que representa la posibilidad para la mejora (Çengel & Boles, 2012, p. 428).

Observese que la exergía de un sistema en un estado especificado depende de las condiciones del medio (el estado muerto) así como de las

propiedades del sistema, por lo tanto la exergía es una propiedad de la combinación entre sistema y ambiente y no del sistema exclusivamente (Çengel & Boles, 2012, p. 428).

II.13. Trabajo reversible e irreversibilidad.

La propiedad exergía sirve como una valiosa herramienta en la determinación de la calidad de la energía y en la comparación de los potenciales de trabajo de diferentes fuentes de energía o sistemas. Sin embargo, la evaluación exclusiva de la exergía no es suficiente para estudiar dispositivos técnicos que operan entre dos estados fijos, ya que cuando se evalúa la exergía siempre se supone que el estado final es el estado muerto, lo cual casi nunca es el caso para los sistemas técnicos reales (Çengel & Boles, 2012, p. 431).

El trabajo no es utilizable en su totalidad. La diferencia entre el trabajo real W y el trabajo de los alrededores $W_{alrededores}$ se denomina trabajo útil W_u (Çengel & Boles, 2012, p. 432):

$$W_u = W - W_{alrededores}$$

El trabajo reversible W_{rev} se define como la cantidad máxima de trabajo útil que puede producirse (o el trabajo mínimo que necesita ser proporcionado) cuando un sistema experimenta un proceso entre los estados inicial y final especificados. Éste es el trabajo de salida útil (o entrada) obtenido (o gastado) cuando el proceso entre los estados inicial y final se ejecuta de una manera totalmente reversible. Cuando el estado final es el estado muerto, el trabajo reversible es igual a la exergía. Para procesos que requieren trabajo, el trabajo reversible representa la cantidad de trabajo mínima necesaria para llevar a cabo ese proceso (Çengel & Boles, 2012, p. 432).

Cualquier diferencia entre el trabajo reversible W_{rev} y el útil W_u , se debe a irreversibilidades presentes durante el proceso, y esta diferencia se llama irreversibilidad I , la cual se expresa como

$$I = W_{rev,sal} - W_{u,sal} \quad \text{o} \quad I = W_{u,ent} - W_{rev,ent}$$

La irreversibilidad es equivalente a la exergía destruida. Para un proceso totalmente reversible, las condiciones reales y reversibles de trabajo son idénticas, por lo tanto la irreversibilidad es cero. Esto era de esperarse dado que los procesos totalmente reversibles no generan entropía. La irreversibilidad es una cantidad positiva para todo proceso real (irreversible) porque $W_{rev} \geq W_u$ para dispositivos productores de trabajo y $W_{rev} \leq W_u$ para dispositivos consumidores de trabajo (Çengel & Boles, 2012, p. 432).

La irreversibilidad puede verse como el trabajo desperdiciado o la oportunidad perdida para realizar trabajo. Representa la energía que podría convertirse en trabajo pero que no lo fue. Cuanta más pequeña es la irreversibilidad asociada con un proceso, mayor es el trabajo que se produce (o menor es el trabajo que se consume). El desempeño de un sistema puede mejorarse minimizando la irreversibilidad asociada con él (Çengel & Boles, 2012, p. 433).

II.14. Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa.

La transferencia de calor Q en una ubicación que se encuentra a temperatura termodinámica T siempre está acompañada por la transferencia de exergía B_{calor} en la cantidad de (Çengel & Boles, 2012, pp. 445-447):

$$B_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (kJ)$$

Esta relación brinda la transferencia de exergía que acompaña la transferencia de calor de Q siempre que T difiera de T_0 . La exergía transferida debido al calor es cero cuando $T = T_0$ en el punto de referencia (Çengel & Boles, 2012, p. 445).

La exergía es el potencial de trabajo útil. La transferencia de exergía por trabajo puede expresarse simplemente como

$$B_{trabajo} = \begin{cases} W - W_{alr} & (\text{para trabajo de frontera}) \\ W & (\text{para otras formas de trabajo}) \end{cases}$$

donde $W_{alr} = P_0(V_2 - V_1)$, P_0 es la presión atmosférica, así como V_1 y V_2 son los volúmenes inicial y final del sistema. Por consiguiente, la transferencia de exergía debida al trabajo, como los trabajos de flecha y eléctrico, es igual al trabajo W mismo. En el caso de un sistema que involucra trabajo de frontera, como un dispositivo de cilindro y émbolo, el trabajo realizado para empujar el aire atmosférico durante la expansión no puede transferirse, por lo tanto debe restarse. Asimismo, durante un proceso de compresión una parte del trabajo está hecho por el aire atmosférico, por lo tanto se necesita proporcionar menos trabajo útil de una fuente externa (Çengel & Boles, 2012, p. 446).

Cualquier cantidad de masa contiene exergía, así como energía y entropía, y los contenidos de éstas en un sistema son proporcionales a la masa. También, la velocidad de transportación de exergía, entropía y energía hacia dentro o fuera de un sistema con proporcionales al flujo másico. Cuando una cantidad de masa m entra o sale de un sistema, la acompaña una cantidad de exergía $m\psi$, donde $\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz$. Es decir,

$$B_{masa} = m\psi$$

Por lo tanto, la exergía de un sistema aumenta en $m\psi$ cuando entra la cantidad de masa m , mientras que disminuye en la misma cantidad cuando la misma cantidad de masa en el mismo estado sale del sistema (Çengel & Boles, 2012, p. 447).

II.15. Principio de disminución de exergía: destrucción de exergía.

Considere un sistema aislado. Por definición, ni calor, ni trabajo, ni masa pueden cruzar la frontera de un sistema aislado, por lo tanto no hay transferencia de energía y masa. Entonces, los balances de energía y entropía para un sistema aislado pueden expresarse como (Çengel & Boles, 2012, pp. 447-448):

$$\text{Balance de energía: } E_{ent}^{\uparrow 0} - E_{sal}^{\uparrow 0} = \Delta E_{sistema} \Rightarrow 0 = E_2 - E_1$$

$$\text{Balance de entropía: } S_{ent}^{\uparrow 0} - S_{sal}^{\uparrow 0} + S_{gen} = \Delta S_{sistema} \Rightarrow S_{gen} = S_2 - S_1$$

Al multiplicar la segunda relación por T_0 y restándola de la primera se obtiene

$$-T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1)$$

De la ecuación de cambio de exergía de un sistema cerrado

$$\Delta B = B_2 - B_1 = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

se obtiene:

$$B_2 - B_1 = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1)^{0} - T_0(S_2 - S_1) = (E_2 - E_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

Dado que $V_2 - V_1 = 0$ para un sistema aislado (no puede involucrar ninguna frontera móvil y por ende ningún trabajo de frontera). Al combinar las ecuaciones anteriores, se obtiene

$$-T_0 S_{gen} = B_2 - B_1 \leq 0$$

Dado que T_0 es la temperatura termodinámica del ambiente y por lo tanto una cantidad positiva y $S_{gen} \geq 0$; en consecuencia, $T_0 S_{gen} \geq 0$. Entonces, se concluye que

$$\Delta B_{aislado} = (B_2 - B_1)_{aislado} \leq 0$$

La exergía de un sistema asilado durante un proceso siempre disminuye o, en el caso límite de un proceso reversible, permanece constante; en otros términos, la exergía nunca aumenta y es destruida durante un proceso real. Éste es el principio de disminución de exergía. Para un sistema aislado, la disminución de exergía es igual a la exergía destruida y es proporcional a la entropía generada (Çengel & Boles, 2012, p. 448):

$$B_{destruida} = T_0 S_{gen} \geq 0$$

El principio de disminución de exergía no implica que la exergía de un sistema no pueda aumentar. El cambio de exergía de un sistema puede ser positivo o negativo durante un proceso; pero la exergía destruida no puede ser negativa (Çengel & Boles, 2012, pp. 448-449):

$$B_{destruida} \begin{cases} > 0 & \text{Proceso irreversible} \\ = 0 & \text{Proceso reversible} \\ < 0 & \text{Proceso imposible} \end{cases}$$

La naturaleza de la exergía es opuesta a la de la entropía, en la cual la exergía puede destruirse pero no crearse. Por consiguiente, el cambio de exergía de un sistema durante un proceso es menor que la transferencia de exergía por una cantidad igual a la exergía destruida dentro de las fronteras del sistema durante el proceso. Entonces, el principio de disminución de exergía puede expresarse como

$$\left(\begin{array}{c} \text{Exergía} \\ \text{total que} \\ \text{entra} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Exergía} \\ \text{total que} \\ \text{sale} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Exergía} \\ \text{total} \\ \text{destruida} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en} \\ \text{la exergía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right)$$

o

$$B_{ent} - B_{sal} - B_{destruida} = \Delta B_{sistema}$$

Esta relación se conoce como el balance de exergía y expresa que el cambio de exergía de un sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la transferencia neta de exergía a través de la frontera del sistema y la exergía destruida dentro de las fronteras del sistema como resultado de las irreversibilidades (Çengel & Boles, 2012, p. 449).

Las relaciones de balance de exergía para los volúmenes de control difieren de aquellas para los sistemas cerrados en lo que se involucra un mecanismo más de transferencia de exergía: el flujo másico a través de las fronteras. La masa posee exergía así como energía y entropía, y las cantidades de estas tres propiedades extensivas son proporcionales a la cantidad de masa. Tomando nuevamente la dirección positiva de la transferencia de trabajo desde el sistema, las relaciones generales de balance de exergía puede expresarse más explícitamente para un volumen de control como (Çengel & Boles, 2012, p. 460):

$$B_{calor} - B_{trabajo} + B_{masa,entrada} - B_{masa,salida} - B_{destruida} = (B_2 - B_1)_{VC}$$

II.16. Eficiencia según la segunda ley de la termodinámica.

La eficiencia por primera ley no hace referencia al máximo desempeño posible de los dispositivos térmicos (Jaramillo Salgado, 2007). Como ejemplo, considere dos máquinas térmicas, ambas con la eficiencia térmica

$$\eta_{th} = \frac{\text{Trabajo neto}}{\text{Calor de entrada}}$$

del 30%, pero la máquina térmica *A* opera con una fuente a 600 K, mientras que la *B* opera a 1000 K y ambas ocupan la temperatura atmosférica para desechar calor a 300 K. A primera vista, ambas convierten la misma fracción de calor en trabajo. Sin embargo, se observa que

$$\eta_{rev,A} = 1 - \frac{300}{600} = 50\%$$

$$\eta_{rev,B} = 1 - \frac{300}{1000} = 70\%$$

Ahora es evidente que la máquina térmica *B* tiene un potencial de trabajo más grande que la máquina *A*. Es decir, la máquina térmica *B* se desempeña pobremente ante la máquina *A*, aun cuando ambas tienen la misma eficiencia térmica (Jaramillo Salgado, 2007).

Para medir el desempeño de los equipos o máquinas definimos la eficiencia de segunda ley η_{II} como la relación entre la eficiencia térmica real y la eficiencia térmica máxima posible (en condiciones reversibles), tal que

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{rev}}$$

Con base en esta definición, las eficiencias por segunda ley de los dos sistemas anteriores están dadas por

$$\eta_{II,A} = \frac{30\%}{50\%} = 60\%$$

$$\eta_{II,B} = \frac{30\%}{70\%} = 43\%$$

Esto es, la máquina térmica *A* convierte 60% del potencial del trabajo disponible en trabajo útil. Esta proporción es de sólo el 43% para las máquinas térmicas *B* (Jaramillo Salgado, 2007).

La eficiencia de segunda ley también puede expresarse como la relación entre el trabajo útil y la salida de trabajo máximo posible (reversible), tal que

$$\eta_{II} = \frac{W_{\text{útil}}}{W_{\text{rev}}}$$

Es importante notar que la eficiencia por segunda ley está comprendida entre los valores 0 y 1; es decir, no puede exceder el 100%. También es posible definir una eficiencia para dispositivos que trabajan con la entrada de trabajo (Jaramillo Salgado, 2007):

$$\eta_{II} = \frac{W_{\text{rev}}}{W_{\text{útil}}}$$

Estas definiciones para la eficiencia por segunda ley no se aplican a dispositivos que no están destinados a producir o consumir trabajo, por lo que es necesaria una definición más general. Sin embargo, no hay un acuerdo en una definición general de eficiencia por segunda ley. Esta eficiencia está ideada como una medida de aproximación a la operación reversible, por lo que su valor debe cambiar a cero en el peor de los casos (destrucción completa de exergía), y a uno en el mejor (sin destrucción de exergía); así se puede definir (Jaramillo Salgado, 2007):

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergía recuperada}}{\text{Exergía suministrada}} = 1 - \frac{\text{Exergía destruida}}{\text{Exergía suministrada}}$$

Capítulo III. Los flujos de exergía en los sectores económicos.

III.1. Una visión histórica de la termoeconomía.

Por lo general, se acepta que el concepto básico de exergía fue formado independientemente por Gibbs en Estados Unidos y Maxwell en Inglaterra en el último cuarto del siglo XIX, aunque la primera propuesta en la literatura para utilizar el análisis de la segunda ley con fines de cálculo de costos fue un documento de Keenan en 1932. Si bien Keenan no hace costeo exergético en él, se refiere explícitamente a éste como el medio para asignar apropiadamente los costos asociados con la cogeneración de energía eléctrica y vapor para distribución. Keenan señalaba que los valores del vapor y la electricidad descansaban en su disponibilidad y no en su energía. Aunque su propuesta se basó en el análisis de la segunda ley de la termodinámica, en la práctica el uso de los conceptos de la segunda ley fue eludido (Valero & Torres Cuadra, 2009, p. 4).

La idea de unir exergías y corrientes de costos fue presentada por Benedict en 1948 en un seminario en el M.I.T. Determinó el costo total atribuible a las irreversibilidades de una planta de separación de aire y utilizó este costo para un diseño óptimo. Desafortunadamente, el contenido del seminario no fue publicado hasta los años ochenta. Los primeros trabajos de Keenan y Benedict fueron extendidos por sus estudiantes, especialmente Gyftopoulos, quien trabajó en el concepto de disponibilidad (Valero & Torres Cuadra, 2009, p. 4).

El interés de formular la interacción entre costo y eficiencia fue destacado por primera vez por Tribus y Evans en la UCLA, a principios de los años sesenta. Estaban estudiando los procesos de desalinización y haciendo análisis de exergía, lo que les llevó a la idea de costo exergético y su aplicación a la economía de la ingeniería, para lo que acuñaron la palabra "termoeconomía". La esencia del procedimiento de Evans-Tribus era rastrear el flujo de dinero, costo de combustible y operación y costo de capital amortizado a través de una planta, asociando la utilidad de cada flujo con su exergía. El-Sayed, profesor de Ingeniería Mecánica en Egipto, se correspondía con Evans y Tribus en relación con su trabajo en la desalinización y llegó a trabajar con ellos en los EE.UU. Ellos

publicaron en 1970 un documento clave frecuentemente citado, llamado *Thermoeconomics and the design of heat systems*, donde se dan las bases matemáticas para la optimización de sistemas térmicos (Valero & Torres Cuadra, 2009, pp. 4-5).

También en la década de 1960 Obert y Gaggioli estaban trabajando en el diseño óptimo de la tubería de vapor de una planta de energía. Propusieron costear la exergía del vapor a un valor al de la energía producida, penalizando las irreversibilidades para la electricidad que, por lo tanto, no se produciría. Gaggioli dirigió, en la Universidad de Wisconsin, las tesis de doctorado de Reistad (1970) y Wepfer (1979) sobre métodos de costeo por segunda ley que incluyen la definición de reglas para proporcionar una distribución racional del costo (Valero & Torres Cuadra, 2009, p. 5).

Mientras tanto en Europa, desde la década de 1950, se había desarrollado un gran número de trabajos en el análisis de la segunda ley, especialmente en Europa del Este. En 1952, Rant introdujo el nombre "exergía", tal como lo conocemos actualmente, definido como trabajo útil externo en oposición a la energía (trabajo interno). Otros autores destacados son: Beyer, Baehr, Brodiansky, Szargut, y Knoche entre otros. Algunas de las obras, que también incluyeron análisis termodinámico, fueron compiladas por Kotas en 1985 en el libro *The exergy method of thermal plant analysis*, que es una de las referencias básicas en el análisis exergético y la termoeconomía (Valero & Torres Cuadra, 2009, p. 5).

El esfuerzo integral para aplicar la termoeconomía al análisis, optimización y diseño de sistemas térmicos no comenzó hasta la década de 1980. En 1985, cuando Gaggioli, que dirigía el Comité Técnico de Análisis de Sistemas de la División de Sistemas Avanzados de Energía (AESD) de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASEM), se reunió y se esforzó por ampliar la participación de científicos no estadounidenses y grupos de investigación que trabajaban en análisis avanzados de segunda ley y en termoeconomía. Bajo esta idea se creó una serie de reuniones internacionales anuales de AESD, que se centraron en los aspectos modernos de las ciencias térmicas, con especial énfasis en la

termodinámica de ingeniería, incluyendo el análisis de exergía y la termoeconomía. La primera tuvo lugar en Roma en 1997 y estuvo presidida por Enrico Sciubba y Michael Moran (Valero & Torres Cuadra, 2009, p. 5).

Es en ese momento que la termoeconomía realmente despegó. El interés y los trabajos relativos al análisis termoeconómico han aumentado mucho: Tsatsaronis (1985), introduce los conceptos clave de combustible y producto. Frangopoulos (1983) y Von Spavovsky (1986), cuyas tesis doctorales dirigidas por Evans aplicaron y formalizaron el método autónomo de Evans y El-Sayed. En 1986 Valero y sus compañeros de trabajo publicaron otro artículo clave (*A general theory of energy saving*), donde se introdujo la teoría del costo exergético (Valero & Torres Cuadra, 2009, p. 5).

El "Congreso y Exposición Internacional de Ingeniería Mecánica" (IMECE), anteriormente "Reunión Anual de Invierno" de ASME y las conferencias de la contraparte estadounidense sobre Eficiencia, Costo, Optimización y Simulación de Sistemas Energéticos (ECOS), son las referencias clave para seguir el estado actual del arte desde sus inicios. ECOS y conferencias relacionadas han tenido lugar en Italia, China, Grecia, España, Polonia, Turquía, Alemania, Francia, Japón, México y países escandinavos. En estos países, entre otros, hay grupos de investigación activos en sistemas energéticos avanzados, incluyendo el análisis de exergía y la termoeconomía (Valero & Torres Cuadra, 2009, pp. 5-6).

Los métodos termoeconómicos se subdividen generalmente en dos categorías, las basadas en la contabilidad de costes (la teoría del costo exergético, el método de costo promedio, el enfoque de la última en la primera salida) y los basados en técnicas de optimización (análisis funcional termoeconómico, análisis funcional de ingeniería). Los métodos de contabilidad de costos ayudan a determinar el costo real de los productos y proporcionan una base racional para la fijación de precios, mientras que los métodos de optimización se usan para encontrar condiciones óptimas de diseño u operación (Valero & Torres Cuadra, 2009, p. 6).

III.2. Fundamentos de la teoría del costo exergético.

Una planta de energía térmica o una planta química son ejemplos de sistemas de energía formados a partir de un conjunto de subsistemas o unidades, que están interrelacionados a través de los flujos de materia y energía que procesan. Estos sistemas interactúan con su entorno, consumiendo algunos recursos externos, que luego se transforman en ciertos productos. El propósito final de esta transformación es aumentar la utilidad económica (Lozano & Valero, 1993, p. 940).

El concepto de eficiencia es un factor clave en cualquier teoría de la producción. El deseo de producir cierto bien es externo al sistema; éste es la causa final y debe definirse de antemano. Una vez hecho, el diseño del sistema y su estructura funcional deberá ajustarse al objetivo de utilizar los recursos disponibles (capital, materias primas, mano de obra, etc.) a la causa material de manera eficiente. Toda definición de eficiencia exige una comparación entre el producto obtenido y los recursos necesarios para obtenerlo. Ambos conceptos deberán expresarse en unidades equivalentes (Lozano & Valero, 1993, p. 940).

Se considera como \mathcal{P} a la producción de un proceso (producto) y como F al consumo de recursos (combustible), ambos medidos en términos de sus exergías. De esta manera, la siguiente ecuación será satisfecha:

$$F - \mathcal{P} = I \geq 0$$

donde $I = T_0 S_{gen}$ es la cuantificación, en términos de exergía destruida, de la irreversibilidad del proceso. La eficiencia termodinámica real estará dada por

$$\eta_b = \frac{\mathcal{P}}{F} \leq 1$$

un número adimensional que, debido al hecho de que necesariamente oscila entre 0 y 1, representa una razón universal para medir la calidad termodinámica del proceso. El inverso de la función de eficiencia entonces definido representa el costo exergético unitario del producto, a saber

$$k_{\mathcal{P}} = \frac{F}{\mathcal{P}} = \frac{1}{\eta_b} \geq 1$$

En un sentido estricto, la meta de la optimización de la energía debe de estar dirigida hacia la minimización del costo exergético unitario de los productos funcionales (Lozano & Valero, 1993, p. 940).

Después de determinar las relaciones conceptuales de la segunda ley, la eficiencia y el costo exergético, la aplicación de la teoría general de sistemas nos permite (Lozano & Valero, 1993, p. 940):

- Desglosar la irreversibilidad o ineficiencia de un sistema, sin importar cuán complejo sea, en unidades o conceptos (análisis exergético).
- Calcular el costo exergético de sus flujos internos y productos finales (control de costo).
- Medir el impacto de consumo de combustible causado por la operación incorrecta de cualquier unidad del sistema (auditoría exergética).

La evaluación final de cualquier proceso debe ser llevada a cabo en términos monetarios, incorporando cada uno de los recursos usados en el costo de los flujos y productos internos. Los sistemas industriales con procesos de transformación de energía son determinados por dos ambientes relacionados (Lozano & Valero, 1993, pp. 940-941):

- El ambiente físico, que está compuesto por el RE, energía y materias primas.
- El ambiente económico caracterizado por precios de mercado, junto con medidas corrosivas del capital que incluyen, por ejemplo, depreciación y reglas de contabilidad de mantenimiento.

Cuando analizamos el proceso de formación de flujos y productos internos de un sistema, tomando en cuenta sólo el ambiente físico, la variable relevante es el costo exergético, que nos informa de la cantidad de exergía que es necesaria para su producción. Ésta dependerá tanto de la estructura del sistema (relaciones funcionales entre unidades y flujos) como del desempeño (eficiencia exergética) de las unidades. Una mejora en la estructura del sistema o en la eficiencia de las

unidades siempre implicará menor consumo de recursos (Lozano & Valero, 1993, p. 941).

Cuando el ambiente económico es considerado, la perspectiva es medida por la introducción de dos factores adicionales: los precios de mercado c_F , que no están necesariamente ligados a la exergía de los recursos procesados, y el costo por la depreciación y mantenimiento de la instalación necesario para el proceso productivo Z . La optimización económica de un sistema es mucho más complejo que la pura optimización termodinámica, así como la existencia de diversos factores involucrados. La mejora en la estructura del sistema o en la eficacia de las unidades significará normalmente un incremento en el costo de capital. Para este problema de optimización, la función objetivo es el costo económico unitario del producto, a saber (Lozano & Valero, 1993, p. 941):

$$c_P = \frac{c_F F + Z}{P} = c_F k_P + \frac{Z}{P}$$

III.3. Las estructuras física y productiva.

El problema fundamental de la distribución de costos puede ser formulado como sigue (Lozano & Valero, 1993, p. 941):

Dado un sistema cuyos límites han sido definidos y un nivel de agregación que especifique los subsistemas que lo constituyen, obtener el costo de todos los flujos que se interrelacionan en la estructura.

Una irreversibilidad alta (I_i) en un subsistema i siempre implica un consumo más alto de recursos de la planta (F_T) si los productos (P_i y P_T) permanecen constantes (Lozano & Valero, 1993, pp. 941-942). Es esencial saber cómo ligar la variación en la irreversibilidad local (ΔI_i) con el incremento de los recursos consumidos (ΔF_T). Así, el cociente $\Delta F_T / \Delta I_i$ define un costo que es muy usado por el análisis termoeconómico de sistemas (Lozano & Valero, 1993, p. 940).

Tres condiciones básicas son expuestas en orden para crear la teoría de costos (Lozano & Valero, 1993, p. 940):

- Los límites definidos del sistema y la definición de recursos son siempre parciales y se refieren al sistema bajo estudio. Generalmente hablando, energía, materias primas, economía, información y recursos laborales son puestos a disposición del sistema con sus límites de análisis y con precios unitarios conocidos.
- El nivel de agregación provee una descomposición de la irreversibilidad total entre los componentes del sistema. El nivel elegido de agregación afectará la conclusión del análisis. De hecho, si no se tiene más información acerca del sistema que aquel definido por su nivel de agregación, no se puede demandar del conjunto de costos obtenidos más que la información que se ha introducido. A la inversa, el analista, no la teoría, tendrá que desagregar la planta en flujos y subsistemas hasta que la información pueda ser usada efectivamente.
- La eficiencia es un indicador del buen comportamiento de los subsistemas, porque, como se ha visto, la irreversibilidad está localizada en éstos. La eficiencia y la irreversibilidad deben de conectar a cada uno con el resto de las variables técnicas y económicas que los afectan.

En general, y acorde a la teoría general de sistemas, en una estructura física energética se cumple:

$$\text{energía del sistema} = \text{subsistemas o unidades} + \text{flujos de materia o energía}$$

donde las relaciones entre los flujos y subsistemas está establecida por la matriz de incidencia $\mathbb{A} [n + m]$, siendo n el número de subsistemas y m el número de flujos. Los elementos de la matriz a_{ij} toman el valor +1 si el flujo j entra al subsistema i ; -1 si el flujo sale del subsistema; y 0 si no hay relación física directa entre éstos (Lozano & Valero, 1993, p. 942).

En el caso de la operación en estado estacionario, será posible describir los balances de materia, energía y exergía como sigue:

$$\mathbb{A} \times \mathcal{M} = 0, \quad \mathbb{A} \times E = 0 \quad \text{y} \quad \mathbb{A} \times B = D$$

donde \mathcal{M} , E y B son los vectores columna de dimensión $[m]$ cuyos elementos corresponden con la masa, la energía, y la exergía de los flujos. Cuando el elemento j de los vectores \mathcal{M} , E y B corresponden al flujo de masa, \mathcal{M}_j representa la masa, E_j la energía $\mathcal{M}_j(h_j - h_{j,00})$ y B_j la exergía $\mathcal{M}_j(h_j - T_0s_j - \mu_{j,00})$ del flujo. Si el elemento j corresponde a un flujo de calor o trabajo, entonces $\mathcal{M}_j = 0$, E_j es Q_j ó W_j y B_j es $Q_j(1 - T_0/T_j)$ ó W_j . El elemento D_i del vector columna D de dimensión $[n]$ representa la exergía destruida en la unidad i debido a irreversibilidades internas (Lozano & Valero, 1993, p. 942).

Entre más detallada sea la definición de la matriz de incidencia, mayores serán las posibilidades de análisis de las causas de las ineficiencias de la instalación. Sin embargo, una matriz de incidencia mayor implica un incremento en el número de medidas físicas a ser tomadas en un examen de rendimiento y en la complejidad de cálculo del vector de diagnóstico D . Por lo tanto, será necesario encontrar un nivel óptimo de agregación, que básicamente dependerá de los propósitos del análisis (Lozano & Valero, 1993, pp. 942-943).

En la estructura productiva, para definir la función de cada unidad particular, se indicará claramente cuál flujo o combinación de flujos constituyen el producto de la unidad \mathcal{P} , cuáles son recursos o combustibles consumidos F y, finalmente, cuáles flujos son pérdidas L como aquellos flujos que salen de la unidad y la planta y no son subsecuentemente utilizados (Lozano & Valero, 1993, p. 943).

A fin de obtener la definición $F - \mathcal{P} - \mathbb{L}$ que mejor represente la función productiva de las unidades, es necesario simultáneamente examinar la transformación energética que toma lugar en éstas. Para las unidades productivas, la definición $F - \mathcal{P} - \mathbb{L}$ debe tener ciertas condiciones, que pueden ser resumidas como sigue (Lozano & Valero, 1993, p. 943):

- Todos los flujos entrantes o salientes de la unidad deberán estar presentes en la definición $F - \mathcal{P} - \mathbb{L}$ sólo una vez.
- Todos los componentes, ya sean flujos individuales o una combinación de flujos de F , \mathcal{P} y \mathbb{L} , deberán de tener una exergía positiva o cero.

- Será posible especificar el balance de exergía correspondiente a la unidad como una función de los flujos en términos de $F - \mathcal{P} - \mathbb{L} = D$.

Usando la definición $F - \mathcal{P} - \mathbb{L}$, se desarrollan matrices \mathbb{A}_F , \mathbb{A}_P y \mathbb{A}_L tal que $\mathbb{A} = \mathbb{A}_F - \mathbb{A}_P - \mathbb{A}_L$. Empezando por esas matrices y usando los datos del diseño y operación de la planta de energía térmica en cuestión, es posible llevar a cabo el análisis exergético y energético de la planta (véase la tabla I) (Lozano & Valero, 1993, p. 944).

Tabla I. Indicadores para el análisis termodinámico convencional de una planta industrial.		
Primera ley		
$F^e = \mathbb{A}_F \times E$	$\mathcal{P}^e = \mathbb{A}_P \times E$	$\mathbb{L}^e = \mathbb{A}_L \times E$
$\eta_i^e = \frac{\mathcal{P}_i^e}{F_i^e} = 1 - \frac{\mathbb{L}_i^e}{F_i^e}$	$k_i^e = \frac{F_i^e}{\mathcal{P}_i^e} = \frac{1}{\eta_i^e}$	$\delta_i^e = \frac{\mathbb{L}_i^e}{F_T^e}$
Segunda ley		
$F = \mathbb{A}_F \times B$	$\mathcal{P} = \mathbb{A}_P \times B$	$\mathbb{L} = \mathbb{A}_L \times B$
$D = \mathbb{A} \times B$	$I = F - \mathcal{P} = \mathbb{L} + D$	
$\eta_i = \frac{\mathcal{P}_i}{F_i} = 1 - \frac{I_i}{F_i}$	$k_i = \frac{F_i}{\mathcal{P}_i} = \frac{1}{\eta_i}$	$\delta_i = \frac{I_i}{F_T}$

Fuente: Lozano & Valero (1993, p. 7).

III.4. La determinación de los costos exergético y exergoeconómico.

El procedimiento racional para la determinación de costos se basa en cuatro premisas (Lozano & Valero, 1993, p. 944):

- P1. El costo exergético de un flujo B^* , combustible F^* o producto \mathcal{P}^* es la cantidad de exergía necesaria para producirlo. Por lo tanto, el costo exergético es una propiedad conservativa, lo que permite formular tantas ecuaciones de balance de costo exergético como número de unidades en la instalación. Estos equilibrios pueden ser expresados, en ausencia de valoraciones externas, como $\mathbb{A} \times B^* = 0$.

- P2. En ausencia de valoraciones externas, el costo exergético de un flujo entrante a la planta iguala su exergía. Este hecho permite formular tantas ecuaciones ($B_j^* = B_j$) como flujos entrantes a la planta.
- P3. Todos los costos generados por el proceso productivo deben de ser incluidos en el costo de los productos finales. En ausencia de valoraciones externas, tenemos que asignar un valor de cero al costo de las pérdidas de la planta, lo que nos permite formular tantas ecuaciones ($B_j^* = 0$) como flujos de pérdida existentes. De esta premisa, y de la primera, obtenemos los siguientes corolarios para cada unidad: $L_i^* = 0$ y $F_i^* = P_i^*$.
- P4a. Si un flujo de salida de una unidad es parte del combustible de esta unidad, entonces es entendido que su costo exergético es el mismo que el del flujo de entrada del cual proviene.
- P4b. Si una unidad tiene un producto compuesto por varios flujos, entonces el costo exergético de la misma unidad será asignado a todos estos. La razón de esta premisa estriba en el hecho de que, aunque dos o más productos puedan ser identificados en la misma unidad, sus procesos de formación son inseparables o indistinguibles al nivel de agregación considerado y, por lo tanto, les asignaremos un costo proporcional a su exergía.

Ahora se considera el problema general y su descripción matricial. Considérese una planta con n unidades y m flujos. Se asume que la exergía de ese flujo es conocida. El conjunto de equilibrios de los costos exergéticos (premisa P1) de las n unidades provienen del siguiente sistema de n ecuaciones (Lozano & Valero, 1993, p. 947):

$$\mathbb{A} \times B^* = 0 \quad [n \times m] \times [m \times 1] = [n \times 1]$$

donde \mathbb{A} es la matriz de incidencia que representa la estructura física de la planta. El número de flujos será tan alto como el número de unidades. En un sentido matricial, este hecho significa la formulación de los elementos de una nueva matriz

α (matriz producción) y un vector columna ω que provea al sistema de ecuaciones auxiliares:

$$\alpha \times B^* = \omega \quad [(m - n) \times m] \times [m \times 1] = [(m - n) \times 1]$$

El sistema de ecuaciones necesario para calcular el costo exergético de los flujos puede ser formulado como sigue:

$$\mathcal{X} \times B^* = \mathcal{Y}^* \quad [m \times m] \times [m \times 1] = [m \times 1]$$

donde $\mathcal{X} = [A|\alpha]^t$ es la matriz de costos y $\mathcal{Y}^* = [-Y^*|\omega]^t$ el vector de valoraciones externas (Y^* iguala a 0 por lo expresado anteriormente) (Lozano & Valero, 1993, p. 947).

Calcular el costo monetario de los flujos internos y productos finales en las plantas de energía o químicas es un problema de mayor importancia, como lo es directamente la conexión de los costos de producción de las diferentes partes, secciones o unidades que constituyen el proceso productivo. Para tal propósito, se tendría que escribir el equilibrio del costo exergoeconómico para cada unidad individual de la planta de la forma siguiente (Lozano & Valero, 1993, p. 948):

$$\Pi_F + Z = \Pi_P$$

donde Π_F (Π_P) es el costo exergoeconómico de los flujos que constituyen el combustible (producto) de la unidad y Z representa la contribución de los factores productivos no energéticos. Considerando la ecuación anterior para todas las unidades de la planta y la premisa P3 para los flujos perdidos, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$A \times \Pi = -Z$$

donde las cantidades desconocidas Π_j son el costo exergoeconómico de los m flujos (Lozano & Valero, 1993, p. 948).

Así como en el caso de los costos exergéticos, $(m - n)$ ecuaciones auxiliares son requeridas para encontrar el costo exergoeconómico de los flujos. Las ecuaciones auxiliares deben de ser formuladas usando de la premisa P2 hasta la P4, a saber

$$\alpha \times \Pi = \Pi_c$$

donde el vector $\Pi_c (\Pi_{c,i} = c_{\omega,i} \omega_i)$ ahora representa la valoración económica externa de los flujos entrantes a la planta.

Se concluye que el problema matemático del cálculo del costo exergoeconómico de los flujos de una planta requiere resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$A \times \Pi = Z \quad [m \times m] \times [m \times 1] = [m \times 1]$$

donde $Z = [-Z|\Pi_c]^t$ es el vector que contiene las valoraciones económicas externas (Lozano & Valero, 1993, p. 948).

La unicidad de la matriz de costos A , cuando la aplicamos al cálculo de los costos exergéticos y exergoeconómicos, refleja el hecho de que pasar de una forma a otra simplemente involucra la modificación de las unidades en las cuales los factores productivos son expresados (kJ ó \$). Hasta ahora, hemos considerado al sistema o planta termodinámicamente sin las relaciones económicas o físicas con otros sistemas o plantas. Los efectos de esas relaciones sobre los costos pueden ser introducidos dentro del análisis por la modificación adecuada del vector de valoraciones externas. En cualquier caso, la matriz de costos permanecerá inalterada. Algunos casos importantes son la amortización exergética, los residuos, las valoraciones de los combustibles de la planta, el costo exergético acumulativo y las unidades disipadas (Lozano & Valero, 1993, p. 948).

III.5. El proceso de formación de costos.

Consideremos una unidad genérica i que forma parte de la planta. El costo unitario exergético y exergoeconómico de su producto puede ser expresado como sigue:

$$k_{\mathcal{P},i}^* = \frac{\mathcal{P}_i^*}{\mathcal{P}_i} = \frac{F_i^*}{F_i} = k_{F,i}^* \frac{F_i}{\mathcal{P}_i} = k_{F,i}^* k_i$$

y

$$c_{\mathcal{P},i} = \frac{\Pi_{\mathcal{P},i}}{\mathcal{P}_i} = \frac{\Pi_{F,i} + Z_i}{\mathcal{P}_i} = \frac{c_{F,i}F_i + Z_i}{\mathcal{P}_i} = c_{F,i}k_i + \frac{Z_i}{\mathcal{P}_i}$$

Tomando en cuenta que $k_i - 1 = I_i/\mathcal{P}_i$, entonces $k_{\mathcal{P},i}^* - k_{F,i}^* = k_{F,i}^*I_i/\mathcal{P}_i$ y $c_{\mathcal{P},i} - c_{F,i} = (c_{F,i}I_i + Z_i)/\mathcal{P}_i$. Estas ecuaciones revelan que el costo unitario del producto es siempre mayor o igual que el del combustible. Cualquier diferencia es calculada en términos de costos de irreversibilidad (I_i) y capital (Z_i) (Lozano & Valero, 1993, p. 950).

El factor exergoeconómico de una unidad $\xi_i = Z_i/(c_{F,i}I_i + Z_i)$ ha sido aplicado para evaluar las posibilidades de mejorar el diseño de plantas complejas. Este parámetro mide el peso relativo que el costo de inversión tendría sobre el incremento del costo exergoeconómico unitario en un componente de la planta. Un factor exergoeconómico pequeño muestra que, al menos teóricamente, sería posible y probablemente rentable invertir en la unidad con el fin de mejorar su eficiencia termodinámica (Lozano & Valero, 1993, p. 950).

Ahora se considera un proceso secuencial. El producto de una unidad es el insumo de la siguiente unidad. En este caso, una valoración convencional externa muestra que

$$\mathcal{P}_i^* \equiv F_T = \mathcal{P}_i + \sum_{r=1}^i I_r$$

y

$$k_{\mathcal{P},i}^* \equiv \frac{\mathcal{P}_i^*}{\mathcal{P}_i} = \prod_{r=1}^i k_r$$

Estas expresiones muestran que el costo exergético unitario del producto de una unidad es igual al producto del consumo exergético unitario de los subsistemas tomando parte en su producción, y que el costo exergético es cargado con la exergía del producto y todas las irreversibilidades ocurridas en estos subsistemas (Lozano & Valero, 1993, p. 950).

III.6. La eficiencia termodinámica productiva $\eta_{\mathcal{P},n}^*$.

El siguiente desarrollo se sigue de las premisas expuestas en el presente capítulo. El costo exergético del producto de la unidad i puede verse como el valor exergético del producto de dicha unidad dado el consumo exergético de los subsistemas que forma parte de dicha producción o, dicho de otra forma, como su valor exergético aunado a todas las irreversibilidades de tales subsistemas:

$$\mathcal{P}_i^* = F_T = \mathcal{P}_i k_{\mathcal{P},i}^* = \mathcal{P}_i \prod_{r=1}^i k_r = \mathcal{P}_i + \sum_{r=1}^i I_r$$

Recordemos, con base en la segunda ley de la termodinámica, que la eficiencia termodinámica real y el costo exergético unitario del producto de la unidad i , que están representados, respectivamente, por:

$$\eta_i = \frac{\mathcal{P}_i}{F_i} = 1 - \frac{I_i}{F_i} \quad k_i = \frac{F_i}{\mathcal{P}_i} = \frac{1}{\eta_i}$$

La eficiencia es un indicador que ha de maximizarse y el costo exergético unitario uno que ha de minimizarse. Tales objetivos se logran mediante la disminución de la entropía generada o de la exergía destruida en el subsistema tratado.

Si el costo exergético unitario del producto de la unidad i es igual al producto del consumo exergético unitario de los subsistemas para su producción

$$k_{\mathcal{P},i}^* = \frac{\mathcal{P}_i^*}{\mathcal{P}_i} = \prod_{r=1}^i k_r$$

entonces la eficiencia termodinámica real del producto de dicha unidad vendría siendo:

$$\eta_{\mathcal{P},i}^* = \frac{\mathcal{P}_i}{\mathcal{P}_i^*} = \frac{\mathcal{P}_i}{F_T} = \frac{\mathcal{P}_i}{\mathcal{P}_i + \sum_{r=1}^i I_r} = \prod_{r=1}^i k_r^{-1} = \prod_{r=1}^i \eta_r$$

La maximización de este parámetro se consigue con las disminuciones de las irreversibilidades del subsistema i y de las unidades que le anteceden. Si se considera a un sector productivo en especial o a todo el aparato energético y

productivo de una economía, este parámetro tiene impactos directos sobre la forma en que sus factores productivos se relacionan para la consecución de un determinado nivel de producción.

Si quiere determinarse la eficiencia termodinámica de una economía vista como un sistema bivalente de tipo energético y productivo, habría que contemplar la eficiencia del producto de los sectores de la economía que producen bienes y servicios finales. Si tenemos que el sector económico bajo consideración tiene n sectores productivos y de servicios, la eficiencia buscada estará determinada por:

$$\eta_{\mathcal{P},n}^* = \prod_{r=1}^n \eta_r$$

Este indicador de la calidad del proceso productivo puede adquirir un valor entre 0 y 1. Resulta ser de gran utilidad debido a que puede señalar el panorama general de la eficacia del uso de recursos materiales y energéticos de las actividades industriales de una empresa, en concreto, o de todo el aparato productivo de una economía.

Las expresiones que involucran variables exergéticas para la cuantificación del valor de los bienes y servicios no son nuevas. Por ejemplo, en su investigación para la reducción al mínimo de las externalidades ambientales generadas por las actividades humanas, (Sciubba, 2012) considera que el costo de un producto (material o inmaterial) está dado por la expresión del proceso de producción, representado como

$$c_{\mathcal{P}j} = f(K, L, B, m, O)$$

donde K es la cantidad de capital monetario (en unidades monetarias) requeridos para su producción, L es la cantidad de trabajo (horas de trabajo), B es la exergía (en Joules) m los materiales necesarios (en kg), y O el costo de remediación ambiental (costo monetario de la acción remedial necesaria para aniquilar o reducir los efectos del producto j en el ambiente). Para la conveniencia del cálculo, la función de producción es asumida a ser de la forma:

$$c_{\mathcal{P}j} = a_K K^{b_K} + a_L L^{b_L} + a_E B^{b_E} + a_M m^{b_M} + a_O O^{b_O}$$

donde a_K, \dots, a_O son los coeficientes dimensionales (porque cada término de la suma anterior debe de tener dimensiones de dólares/unidad o euros/unidad) y los exponentes b dependen del proceso bajo consideración.

El propósito original de (Sciubba, 2012) es expresar tanto la producción como los factores productivos homogéneamente y en términos de exergía. Este autor propone asignar un valor exergético al flujo de energía o materia; sin embargo, para usar la exergía como un cuantificador común para los factores productivos no energéticos restantes K , L y O , advierte que se necesita de un método general para vincular las horas de trabajo y las unidades monetarias a algún flujo exergético de referencia que pueda ser considerado como su respectivo equivalente.

A pesar de la diversidad en las maneras de abordar el tema de la exergía con el proceso de producción, las variantes de la contabilidad exergética son buenos métodos para la cuantificación del valor de uso de los productos, debido a que representan la cantidad de recursos primarios equivalentes en ellos encarnados (Sciubba, 2012, p. 953). La reducción, por tanto, de los flujos de materiales y energía de un sector económico en su respectiva estructura productiva a sus equivalente exergéticos está justificada, al menos empíricamente. Un trabajo más que apoya esta idea es (Rosen, 2008).

El enfoque anterior de cálculos de costos exergéticos es llamado Contabilidad Exergética Extendida (EEA, por sus siglas en inglés), y representa hoy en días una de las metodologías más avanzadas adoptadas con el objetivo de una evaluación más completa de todos los componentes de costos que concurren a la producción en términos de materias primas productos y residuos y subproductos), energía y las llamadas "externalidades" (o factores monetarios) constituidas por el costo de capital y mano de obra para la instalación y operación (Palazzo, 2013, p. 2).

Capítulo IV. La función termoeconómica de producción.

IV.1. El ingreso nacional.

La variable macroeconómica que mide tanto la producción industrial total de bienes y servicios de un país como su renta total es el Producto Interior Bruto (PIB) (Mankiw, 2014, p. 103). Suele considerarse como el mejor indicador de los resultados de la economía. Muchos institutos estadísticos nacionales calculan este dato cada tres meses. Las principales fuentes en las que se basa el dato son tanto datos administrativos, que son subproductos de funciones de los gobiernos, como la recaudación de impuestos, los programas de educación, la defensa y la regulación, como datos estadísticos, que proceden de encuestas oficiales, por ejemplo, a establecimientos minoristas, empresas manufactureras y explotaciones agrícolas. El objetivo del PIB es resumir todos estos datos en una única cifra que representa el valor monetario de la actividad económica en un determinado periodo de tiempo (Mankiw, 2014, p. 65).

Una de las formas de ver este indicador es como la renta total de todos los miembros de la economía y la otra es verlo como el gasto total en la producción de bienes y servicios de la economía. Desde cualquiera de los dos puntos de vista, es evidente por qué el PIB es un indicador de los resultados económicos. Mide algo que preocupa a la gente: su renta. Asimismo, una economía que tenga una elevada producción de bienes y servicios puede satisfacer mejor las demandas de los hogares, las empresas y el Estado (Mankiw, 2014, p. 65).

¿Cómo puede medir el PIB tanto la renta de la economía como el gasto en su producción? La razón se halla en que estas dos cantidades son, en realidad lo mismo: en el caso de la economía en su conjunto, la renta debe ser igual al gasto. Este hecho deriva, a su vez, de otro aún más fundamental: dado que cada transacción tiene tanto un comprador como un vendedor, cada unidad de gasto de un comprador debe convertirse en una unidad de renta para un vendedor (Mankiw, 2014, pp. 65-66).

IV.2. Producto Interno Bruto real.

PIB nominal es el valor de los bienes y servicios expresados a precios corrientes. Obsérvese que el PIB puede aumentar, bien porque suban los precios, bien porque aumenten las cantidades (Mankiw, 2014, p. 74).

Es fácil ver que el PIB calculado de esta forma no es un buen indicador del bienestar económico. Es decir, esta medida no refleja exactamente el grado en que la economía puede satisfacer las demandas de los hogares, las empresas y el Estado. Si se duplicaran todos los precios sin que variaran las cantidades, el PIB nominal se duplicaría. Sin embargo, sería engañoso decir que la capacidad de la economía para satisfacer las demandas se ha duplicado, ya que la cantidad de cada bien producido es la misma (Mankiw, 2014, p. 74).

Un indicador mejor del bienestar económico anotaría la producción de bienes y servicios de la economía sin dejarse influir por las variaciones de los precios. Para ello, los economistas utilizan el PIB real, que es valor de los bienes y servicios medido utilizando un conjunto constante de precios. Es decir, el PIB real muestra qué habría ocurrido con el gasto en producción si las cantidades hubieran cambiado pero los precios no (Mankiw, 2014, p. 74).

A partir del PIB nominal y del PIB real podemos calcular un tercer indicador, el deflactor del PIB, también llamado deflactor implícito de precios del PIB, que es el cociente entre el PIB nominal y el real (Mankiw, 2014, p. 75):

$$\text{Deflactor del PIB} = \frac{\text{PIB nominal}}{\text{PIB real}}$$

El deflactor del PIB refleja lo que ocurre con el nivel general de precios en la economía.

La definición del deflactor del PIB nos permite dividir el PIB nominal en dos partes; una mide las cantidades (PIB real) y la otra los precios (el deflactor del PIB) (Mankiw, 2014, p. 75). Es decir,

$$\text{PIB nominal} = \text{PIB real} \times \text{Deflactor del PIB}$$

El PIB nominal mide el valor monetario corriente de la producción de la economía. El PIB real mide la producción valorada a precios constantes. El deflactor del PIB mide el precio de la producción en relación con el precio que tenía en el año base. Esta ecuación también puede expresarse de la forma siguiente (Mankiw, 2014, p. 75):

$$PIB\ real = \frac{PIB\ nominal}{Deflactor\ del\ PIB}$$

De esta forma, se ve de dónde proviene el nombre de deflactor: se emplea para deflactor (es decir, para eliminar la inflación) el PIB nominal y obtener el PIB real.

Se ha analizado el PIB real como si los precios utilizados para calcular este indicador nunca variaran con respecto a los valores del año base. Si fuera realmente así, los precios se quedarían con el paso del tiempo cada vez más anticuados (Mankiw, 2014, p. 77).

Para resolver este problema, los institutos de estadística suelen actualizar periódicamente los precios utilizados para calcular el PIB real. Cada cinco o diez años aproximadamente, se elige un nuevo año base. Los precios se mantienen fijos y se utilizan para medir las variaciones interanuales de la producción de bienes y servicios hasta que se vuelve a actualizar el año base (Mankiw, 2014, p. 77).

IV.3. La función de producción.

La tecnología de producción de que se dispone determina la cantidad de producción que se obtiene con una determinada cantidad de capital y de trabajo. Los economistas expresan esta relación por medio de una función de producción. Representando la cantidad de producción por medio del símbolo Y , expresamos la función de producción de la manera siguiente (Mankiw, 2014, p. 106):

$$Y = F(K, L)$$

Esta ecuación indica que la producción, medida por lo común a través del PIB real, es una función de la cantidad de capital y la de trabajo. La trascendencia de la

función de producción se debe a que es utilizada en una amplia variedad de modelos económicos, como el modelo de Solow que pretende mostrar cómo interactúan el crecimiento del *stock* de capital, el crecimiento de la población activa y los avances de la tecnología en una economía y cómo afectan a la producción total de bienes y servicios de un país (Mankiw, 2014, pp. 310-314).

Es de considerarse que el término de trabajo en las secciones posteriores del presente trabajo se refiere al factor productivo, en comparación al concepto definido en los capítulos II y III que se refiere al desplazamiento de una partícula a una determinada distancia mediante la acción de una fuerza.

El modelo de crecimiento de Solow supone que la función de producción tiene rendimientos constantes de escala. Este supuesto suele considerarse realista y ayuda a simplificar el análisis. Recuérdese que una función de producción tiene rendimientos constantes de escala si (Mankiw, 2014, p. 311)

$$zY = F(zK, zL)$$

Para cualquier número positivo z . Es decir, si multiplicamos tanto el capital como el trabajo por z , también resulta multiplicada por z la cantidad de producción.

Las funciones de producción que tienen rendimientos constantes de escala nos permiten analizar todas las cantidades de la economía en relación con el tamaño de la población activa. Para ver que es cierto, se igualará z a $1/L$ en la ecuación anterior para obtener:

$$Y/L = F(K/L, 1)$$

Esta ecuación muestra que la cantidad de producción por trabajador Y/L es una función de la cantidad de capital por trabajador K/L . El supuesto de los rendimientos constantes de escala implica que el tamaño de la economía –medido por el número de trabajadores– no afecta la relación entre la producción por trabajador y el capital por trabajador (Mankiw, 2014, p. 311).

Con el supuesto de que el tamaño de la economía no es importante, resultará cómodo representar todas las cantidades por trabajador. Las representamos por medio de letras minúsculas, de tal manera que $y = Y/L$ es la

producción por trabajador y $k = K/L$ es el capital por trabajador. Podemos formular la función de producción de la forma siguiente:

$$y = f(k)$$

donde definimos $f(k) = F(k, 1)$. La ilustración 1 muestra su gráfica.

La pendiente de esta función de producción indica cuánta producción adicional genera un trabajador con una unidad de capital. Esta cantidad es el producto marginal del capital PMK . En términos matemáticos

$$PMK = f(k + 1) - f(k)$$

Obsérvese que en la ilustración 3, a medida que aumenta la cantidad de capital, la función de producción se vuelve más plana, lo que indica que la función de producción muestra que el producto marginal del capital es decreciente. Cuando el valor de k es bajo, el trabajador medio solo tiene un poco de capital para trabajar, por lo que es muy útil una unidad adicional de capital y genera una gran cantidad de producción adicional. Cuando el valor de k es alto, el trabajador medio tiene una gran cantidad de capital, por lo que una unidad adicional sólo eleva algo la producción (Mankiw, 2014, p. 312).

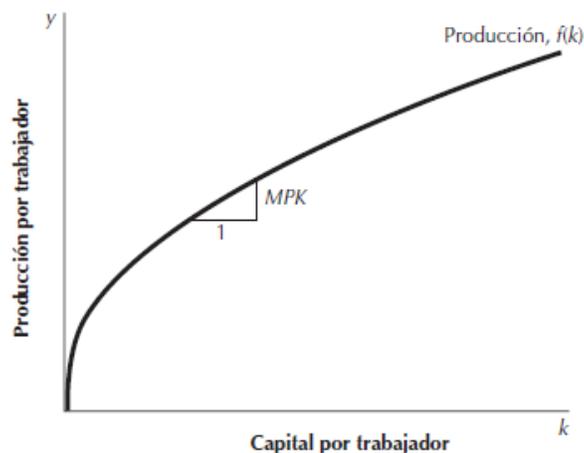


Ilustración 3. La función de producción.
Fuente: Mankiw (2014, p. 313).

IV.4. La productividad total de los factores.

Desde principios de los años setenta, los responsables de la política económica de todo el mundo se encontraron con un problema ciertamente desconcertante: una desaceleración mundial del crecimiento económico. La tabla II presenta datos sobre el crecimiento del PIB real per cápita de las siete mayores economías del mundo, así como de España y de las cinco mayores economías de Latinoamérica. En Estados Unidos, el crecimiento pasó del 2.2% antes de 1972 al 1.5. En otros países, experimentó una disminución similar o mayor. En Latinoamérica, hubo un estancamiento general entre las décadas de los setenta y noventa, aunque se han vuelto a alcanzar niveles altos de crecimiento en los últimos diez años. Incluso las pequeñas variaciones de la tasa de crecimiento, cuando van acumulándose durante muchos años, influyen significativamente en el bienestar económico. En Estados Unidos, la renta real es hoy casi un 25% menor de lo que habría sido si la economía hubiera seguido creciendo al mismo ritmo que antes (Mankiw, 2014, pp. 368-369).

Algunos estudios han mostrado que esta desaceleración es atribuible a una disminución de la tasa a la que la función de producción estaba mejorando con el paso del tiempo. Los economistas miden estos cambios de la función con una variable llamada productividad total de los factores, que está estrechamente relacionada con la eficiencia del trabajo en el modelo de Solow (Mankiw, 2014, p. 369). A continuación se presentará una técnica que divide el crecimiento de la producción en tres fuentes distintas: los aumentos del capital, los del trabajo y los avances de la tecnología. Esta división nos permitirá medir la tasa de cambio tecnológico.

Tabla II. Crecimiento de la producción per cápita (porcentaje anual)			
País	1948-1972	1972-1995	1995-2012
Canadá	2.9	1.8	1.6
Francia	4.3	1.6	1
Alemania occidental	5.7	2	
Alemania			1.3
Italia	4.9	2.3	0.4
Japón	8.2	2.6	0.7
Reino Unido	2.4	1.8	0.7
Estados Unidos	2.2	1.5	1.4
España	4.9	2.3	1.5
Argentina	1.7	0.3	2.6
Brasil	3.5	2.3	1.8
Colombia	2	2.2	1.9
México	3	1.4	1.2
Venezuela	1.7	-0.7	1.1

Fuente: Mankiw (2014, p. 368).

Se observa, en primer lugar, cómo contribuye el aumento de los factores de producción al aumento de la producción. Para ello se comienza suponiendo que no hay cambio tecnológico, por lo que la función de producción que relaciona la producción Y con el capital K y el trabajo L se mantiene constante con el paso del tiempo:

$$Y = F(K, L)$$

En este caso, la cantidad producida sólo varía porque varía la cantidad de capital o la del trabajo (Mankiw, 2014, p. 384).

Considérese, en primer lugar, las variaciones del capital. Si la cantidad de capital aumenta en ΔK unidades, para saber en cuanto aumenta la producción, es necesario recordar la definición del producto marginal del capital $PMgK$:

$$PMK = F(K + 1, L) - F(K, L)$$

El producto marginal del capital indica cuánto aumenta la producción cuando se incrementa el capital en una unidad. Por lo tanto, cuando el capital aumenta en ΔK unidades, la producción aumenta aproximadamente en $PMK \times \Delta K$ (Mankiw, 2014, pp. 384-385).

Considérese, a continuación, las variaciones del trabajo. Si la cantidad de trabajo aumenta ΔL unidades, para saber en cuánto aumenta la producción se seguirá el mismo procedimiento que el caso del capital. El producto marginal de trabajo $PMgL$ indica cuánto varía la producción cuando se incrementa el trabajo en una unidad, es decir,

$$PML = F(K, L + 1) - F(K, L)$$

Por consiguiente, cuando se incrementa la cantidad de trabajo en ΔL unidades, la producción aumenta aproximadamente en $PML \times \Delta L$ (Mankiw, 2014, p. 385).

Se examinará, por último, el caso más realista en el que varían ambos factores de producción. Se supone que la cantidad de capital aumenta en ΔK y la del trabajo en ΔL . El aumento de la producción proviene de dos fuentes: más capital y más trabajo. Podemos dividir este aumento en las fuentes utilizando los productos marginales de los dos factores:

$$\Delta Y = (PMK \times \Delta K) + (PML \times \Delta L)$$

El primer término entre paréntesis es el aumento de la producción provocado por el incremento del capital y el segundo es el aumento de la producción originado por el incremento del trabajo. Esta ecuación muestra cómo se atribuye el crecimiento a cada factor de producción.

Ahora se expresará esta última ecuación de manera que sea más fácil de interpretar y de aplicar a los datos existentes. En primer lugar, tras algunas manipulaciones algebraicas, la ecuación se convierte en

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \left(\frac{PMgK \times K}{Y} \right) \frac{\Delta K}{K} + \left(\frac{PMgL \times L}{Y} \right) \frac{\Delta L}{L}$$

Esta forma relaciona la tasa de crecimiento de la producción $\Delta Y/Y$, con la tasa de crecimiento del capital $\Delta K/K$, y la tasa de crecimiento del trabajo $\Delta L/L$.

A continuación, es necesario encontrar alguna manera de medir los términos entre paréntesis de la última ecuación. El producto marginal del capital es igual a su precio real de alquiler. Por lo tanto, $PMgK \times K$ es el rendimiento total del capital y $(PMgK \times K)/Y$ es la participación del capital en la producción. Asimismo,

el producto marginal del trabajo es igual al salario real. Por lo tanto, $PMgL \times L$ es la remuneración total que percibe el trabajo y $(PMgL \times L)/Y$ es la participación del trabajo en la producción. De acuerdo con el supuesto de que la función de producción tiene rendimientos constantes de escala, el teorema de Euler nos dice que estas dos participaciones suman 1. En este caso, se puede escribir

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \alpha \frac{\Delta K}{K} + (1 - \alpha) \frac{\Delta L}{L}$$

donde α es la participación del capital y $1 - \alpha$ es la del trabajo (Mankiw, 2014, pp. 385-386).

IV.5. El progreso tecnológico.

Hasta ahora se ha supuesto en el análisis de las fuentes de crecimiento que la función de producción no varía con el paso del tiempo. En la práctica, el progreso tecnológico mejora y, por lo tanto, la función de producción. Con una cantidad dada cualquiera de factores, obtenemos más producción hoy que hace unos años. Por ello, se amplía el análisis para tener en cuenta el progreso tecnológico (Mankiw, 2014, p. 387).

Se Incluyen los efectos de los cambios de la tecnología formulando la función de producción de la forma siguiente:

$$Y = AF(K, L)$$

donde A es una medida del nivel actual de tecnología llamada productividad total de los factores. Ahora la producción aumenta no sólo porque aumentan el capital y el trabajo, sino también porque aumenta la productividad total de los factores. Si ésta aumenta un 1 por ciento y si los factores no varían, la producción aumenta un 1 por ciento (Mankiw, 2014, p. 387).

La introducción del cambio tecnológico añade otro término a la ecuación que explica el crecimiento económico (Mankiw, 2014, p. 387):

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \alpha \frac{\Delta K}{K} + (1 - \alpha) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A}$$

El crecimiento de la producción es igual a la contribución del capital más la del trabajo más el crecimiento de la productividad total de los factores. Ésta es la ecuación clave de la contabilidad del crecimiento. Identifica y nos permite medir las tres fuentes de crecimiento: las variaciones de la cantidad de capital, las variaciones de la cantidad de trabajo y las variaciones de la productividad total de los factores (Mankiw, 2014, p. 387).

Como la productividad total de los factores no es observable directamente, se mide de forma indirecta. Se tienen datos sobre el crecimiento de la producción, el capital y el trabajo; también sobre la participación del capital en la producción. A partir de estos datos y de la ecuación de la contabilidad del crecimiento, se puede calcular el crecimiento de la productividad total de los factores:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta Y}{Y} - \alpha \frac{\Delta K}{K} - (1 - \alpha) \frac{\Delta L}{L}$$

$\Delta A/A$ es la variación de la producción que no puede atribuirse a las variaciones del trabajo y el capital. Por lo tanto, el crecimiento de la productividad total de los factores se calcula como un residuo, es decir, como la cantidad de crecimiento de la producción que queda una vez que hemos tenido en cuenta los determinantes del crecimiento que podemos medir directamente. De hecho, $\Delta A/A$ a veces se denomina residuo de Solow, en honor a Robert Solow, que fue quien primero mostró cómo se calculaba (Mankiw, 2014, pp. 387-388).

La productividad total de los factores puede variar por muchas razones. La mayoría de las variaciones se deben a un aumento de los conocimientos sobre los métodos de producción, por lo que a menudo se utiliza el residuo de Solow como una medida del progreso tecnológico. Sin embargo, hay otros factores como la educación y las normas legales, que pueden afectar también a la productividad total de los factores. Por ejemplo, si un incremento del gasto público mejora la calidad de la educación, los trabajadores pueden ser más productivos y la producción puede aumentar, lo que implica que aumentará la productividad total de los factores. Por poner otro ejemplo, si la legislación obliga a las empresas a comprar capital para reducir la contaminación o aumentar la seguridad de los

trabajadores, el *stock* de capital puede aumentar sin que crezca la producción, lo que significa una reducción de la productividad total de los factores. La productividad total de los factores recoge todo lo que altera la relación entre los factores medidos y la producción medida (Mankiw, 2014, p. 388).

IV.6. La función de producción y la eficiencia productiva.

A continuación, se emitirá un comentario acerca de la productividad total de los factores. La productividad A depende del nivel tecnológico y resulta ser la constante de proporcionalidad entre la cesta de factores productivos compuesta por capital productivo K (que incluye también materias primas) y trabajo L . Si se observa con atención, el nivel tecnológico de esta productividad está relacionado con un conjunto de variables de tipo tecnológico, con un valor fijo en un determinado momento en el tiempo:

$$A = A(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_n)$$

En el caso del presente trabajo de investigación, se ha insistido en la reversibilidad de los procesos naturales. Más adelante el caso de los procesos productivos.

Tomando en cuenta este concepto de la termodinámica y la termoeconomía, para el entendimiento de algunos fenómenos y análisis de problemas, se propone la siguiente versión modificada de la función de producción para el estudio del crecimiento económico:

$$Y = A F(K, L) = A_{rev} \eta_{P,n}^* F(K, L)$$

donde $A = A_{rev} \eta_{P,n}^*$. $0 \leq \eta_{P,n}^* \leq 1$ es la eficiencia termodinámica real del sistema productivo de la economía que comprende, desde aquellos sectores que se dedican a la provisión de materias primas, hasta aquellos que las transforman en bienes finales y que brindan servicios. A_{rev} será definida como la productividad total reversible de los factores y operará en estas últimas condiciones, respectivamente (es decir, en un sistema productivo sin irreversibilidades, siempre que éstas sean económicamente posibles). En adelante, para fines prácticos, a esta función se le llamará función termoeconómica o exergética de producción.

Un valor de $\eta_{p,n}^*$ cercano a 0 indica la producción de una economía con gran despilfarro exergético, ya sea de tipo energético o material, y uno cercano a 1 es la de aquella economía con una tecnología que, prácticamente y en conjunto, no genera entropía ni posee flujos de materia o energía de pérdida. Asimismo, A_{rev} es un valor positivo que refleja la máxima proporción teórica posible entre la producción (micro o macroeconómica) y los factores capital y trabajo, que se logra en un proceso industrial que no destruye exergía. En la práctica, es imposible encontrar una producción con estas características, aunque la fórmula nos da una idea de que siempre será posible acercarnos cada vez más a este máximo valor cuando $\eta_{p,n}^*$ tiende a uno.

Tómese en cuenta que, en la función exergética de producción, cuando la productividad total reversible de los factores A_{rev} , el capital K y el trabajo L permanecen constantes, si la eficiencia termodinámica real del sistema energético $\eta_{p,n}^*$ aumenta, también lo hace la producción Y ; y un decremento de $\eta_{p,n}^*$ deriva en una disminución de Y . En adelante, el primer movimiento, respectivamente, se llamará expansión exergética y el segundo contracción exergética. La expansión se logrará con la disminución de las irreversibilidades del sistema productivo, recordando que las principales son:

- Fricción.
- Expansión libre de gases.
- Transferencia de calor debida a una diferencia finita de temperatura.
- Mezclado de fluidos.
- Resistencia eléctrica.
- Deformación inelástica de sólidos.
- Reacciones químicas.
- Flujos que salen de la unidad o la planta y no son subsecuentemente utilizados.

IV.7. Crecimiento por productividad y por eficiencia.

Wilhelm Ostwald (1853-1932), un gran químico famoso por su edición de textos clásicos de química y física, galardonado con el premio Nobel por sus estudios sobre catálisis, había desarrollado la idea de que la historia humana estaba relacionada con el crecimiento de la disponibilidad de energía y con el aumento de la eficiencia con que puede ser transformada (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991, pp. 225-235). Escribió algunos libros siguiendo estas líneas, como *Fundamentos energéticos de la ciencia de la cultura* (1909).

El desarrollo de la cultura, había escrito Ostwald, dependía de la disponibilidad de energía así como de la eficacia de su transformación. Ostwald definía el progreso cultural como el aumento en la disponibilidad de energía y como la sustitución de energía humana por otras fuentes alternativas. También lo definió en términos de un aumento en la eficiencia termodinámica de la utilización de la energía.

Por su parte, para Max Weber (1864-1920) el aumento en la eficiencia termodinámica del uso de energía era absurdo. Aunque cada generación de máquinas de vapor había aumentado en eficiencia en aquellos tiempos, muchos nuevos procesos industriales no aumentaban, sino que más bien tendían a disminuir la eficiencia termodinámica; sin embargo, Ostwald los consideraba como progreso técnico.

Según (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991), ni Max Weber ni Ostwald habían considerado cómo se determinaban los precios de los recursos agotables. El tejido manual resultaba más caro que el realizado a máquina porque se había inventado la máquina de vapor y porque el carbón era barato. A pesar de su baja eficiencia, el motor de combustión interna había ganado un margen de competitividad en algunas partes del mundo y en ciertos periodos, debido a que el petróleo era barato gracias a su abundante oferta y a sus bajos costos de extracción.

Las máquinas de vapor, en la época en que escribía Weber, tenían eficiencias pequeñas, de 5%, mientras que el cuerpo humano puede convertir

energía alimenticia en trabajo con una eficiencia del orden de 20%, tal como se ha sabido desde los años de 1860. El trabajo realizado con una máquina eléctrica es tal vez energéticamente menos eficiente que el realizado por el cuerpo humano. No obstante, resulta evidente que la cantidad de trabajo realizada hoy en día en una economía industrial no puede llevarse a cabo con sólo la intervención humana o animal (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991, p. 230).

En palabras de (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991, p. 232), Weber había hecho notar que Ostwald no había podido explicar la introducción de nuevas formas de energía, que resultaban no más eficientes, en términos energéticos, sino menos, al contrario de lo que Ostwald suponía en su definición de progreso cultural. Sin embargo, con base en la función exergética de producción planteada, puede observarse que tanto Ostwald como Weber se enfocaron sólo en la descripción de una de dos partes de un mismo fenómeno: con eficacia de la transformación de la energía, Wilhelm Ostwald pudo haberse referido al aumento de la eficiencia termodinámica $\eta_{P,n}^*$ de un sistema técnico, en tanto que Max Weber pudo haber hecho referencia al aumento de la productividad total reversible de los factores A_{rev} .

Decía Max Weber que muchos nuevos procesos industriales no aumentaban, sino que más bien tendían a disminuir la eficiencia termodinámica (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991). La descripción de esta parte de la historia del desarrollo industrial puede que sea correcta, pero no entra necesariamente en contradicción con las ideas de Ostwald. Supóngase que en una economía existe una cesta inicial de factores productivos con capital K_0 y trabajo L_0 tal que:

$$Y_0 = A_0 F(K_0, L_0)$$

Siguiendo a Weber, un nuevo proceso productivo con una eficiencia termodinámica implícita menor lleva a:

$$Y_1 = A_1 F(K_0, L_0)$$

con $Y_0 < Y_1$, $A_0 < A_1$. Lo que Weber no tomó en cuenta es que las innovaciones tecnológicas, a pesar de que destruyen más exergía que la vieja tecnología por su

condición de ser primerizas, tienen una mayor productividad total reversible de factores que hace que la productividad real sea superior a la original. Es decir:

$$Y_0 = A_{rev}^0 \eta_{\mathcal{P},n,0}^* F(K_0, L_0) < Y_1 = A_{rev}^1 \eta_{\mathcal{P},n,1}^* F(K_0, L_0)$$

tal que $\eta_{\mathcal{P},n,0}^* > \eta_{\mathcal{P},n,1}^*$, pero A_{rev}^1 es tan grande que $A_0 < A_1$. Ni Ostwald ni Weber llevaron a cabo ningún estudio acerca de cómo grupos humanos concretos se adaptan al flujo de energía disponible y cómo lo modifican (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991, p. 226), lo que no significa que actualmente no podamos saber más acerca de la productividad reversible.

IV.8. La productividad total reversible de los factores A_{rev} .

El crecimiento económico desde finales del siglo XVIII ha atravesado por cinco etapas distintas, asociadas con cinco revoluciones tecnológicas sucesivas. Revolución industrial fue el nombre dado a la irrupción de la máquina y la inauguración de la era industrial. A mediados del siglo XIX era común que la gente se refiriera a su tiempo como la era del vapor y los ferrocarriles y, más adelante, cuando el acero reemplazó al hierro y la ciencia transformó a la industria, el nombre fue el de era del acero y la electricidad. Hacia 1920 se habló de la era del automóvil y la producción en masa, y desde la década de los setenta, las denominaciones era de la información o sociedad del conocimiento son cada vez más comunes (Pérez, 2004, p. 34).

Para que una sociedad se enrumbe decididamente en la dirección de un nuevo conjunto de tecnologías, debe aparecer un atractivo muy visible, que simbolice todo el nuevo potencial y sea capaz de despertar imaginación tecnológica y de negocios de una pléyade de pioneros. Su poder debe de residir en que, además, sea barato o deje en claro que los negocios basados en las innovaciones asociadas con él tendrán un costo competitivo. Así, cada revolución tecnológica es resultado de la interdependencia sinérgica de un grupo de industrias con una o más redes de infraestructura (Pérez, 2004, p. 36). La tabla III identifica las cinco revoluciones tecnológicas, así como las constelaciones que las conforman.

Como comentario a la teoría de las revoluciones tecnoeconómicas, se puede decir que cada revolución tecnológica cuenta de las distintas formas en cómo los grupos sociales se han adaptado a lo largo de la historia a los diversos flujos de energía y materia de la naturaleza. Los iniciadores de cada revolución propiamente reducen el nivel de la eficiencia termodinámica real $\eta_{P,n}^*$ de las economías de referencia, como bien lo dijo Weber; pero el aumento de la productividad total reversible de los factores A_{rev} , cuando la informática viene a complementar las actividades de la era del petróleo, por ejemplo, o cuando el automóvil lo hace con respecto a la era del acero, más que aumenta la productividad total real de los factores A de la era previa. Esta idea toma sentido si se toma en cuenta que los estudios sobre historia y energía de Ostwald, Patrick Geddes (1854-1932), Eduard Sacher (1834-1903), Leopold Pfaundler (1839-1920) y Serhii Podolinsky (1850-1891), apuntan a la aceleración del uso de la energía con el paso del tiempo por las sociedades humanas (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991, pp. 145-156).

La sencillez de la función exergética de producción podría dar a entender que sólo basta con el aumento de la productividad reversible A_{rev} y la eficiencia termodinámica $\eta_{P,n}^*$ para derivar en un incremento de la producción Y de una unidad productiva; empero, sería necesario analizar otro tipo de fenómenos económicos como la evolución de una estructura de mercado a través del tiempo o la facilidad con que circula la información necesaria para la producción con un nuevo proceso industrial para revisar las limitantes crecimiento del ingreso. Para tales propósitos, sería necesario revisar lo que (Pérez, 1992, pp. 29-39) dice en lo que se refiere a las oportunidades tecnológicas cambiantes y la reorientación de las estrategias de desarrollo.

Tabla III. Revoluciones tecnológicas e infraestructuras			
Revolución tecnológica	País núcleo	Iniciador de la revolución	Infraestructuras redefinidas
1ª. Revolución industrial.	Inglaterra.	Apertura de la hilandería de algodón de Arkwright en Cromford (1771).	* Canales y vías fluviales. * Carreteras con peaje. * Energía hidráulica.
2ª. Era del vapor y los ferrocarriles.	Inglaterra (difundiéndose hacia Europa y EUA).	Prueba del motor de vapor <i>Rocket</i> para el ferrocarril Liverpool-Manchester (1829).	* Ferrocarriles. * Servicio postal estandarizado. * Telégrafo.
3ª. Era del acero, la electricidad y la ingeniería pesada.	EUA y Alemania sobrepasando a Inglaterra.	Inauguración de la acería Bessemer de Carnegie en Pittsburgh, Pennsylvania (1875).	* Navegación mundial en barcos de acero. * Redes transnacionales de ferrocarril. Grandes puentes y túneles.
4ª. Era del petróleo, el automóvil y la producción en masa.	EUA y Alemania. Difusión hacia Europa.	Salida del primer modelo-T de la planta Ford en Detroit, Michigan (1908).	* Redes de caminos, autopistas, puertos y aeropuertos. * Redes de oleoductos. * Electricidad de pleno cobertura.
5ª. Era de la informática y las telecomunicaciones.	EUA (difundiéndose hacia Europa y Asia).	Anuncio del microprocesador Intel en Santa Clara, California (1971).	* Comunicación digital mundial. * Internet. * Transporte físico de alta velocidad.

Fuente: Elaboración propia con información de Pérez (2004, pp. 35, 39).

El proceso de propagación de cada paradigma u onda tecnológica pasa por cuatro periodos distintos: difusión inicial, rápido crecimiento temprano, rápido crecimiento tardío y madurez. Durante el periodo de difusión inicial, cuando aparece un paradigma, éste trae consigo racimos de innovaciones radicales en productos y procesos, proporcionando múltiples oportunidades para efectuar nuevas inversiones y dando lugar al nacimiento de nuevas industrias, y nuevos sistemas y subsistemas tecnológicos. Un nuevo paradigma puede verse también como un conjunto de posibilidades técnicas y organizativas para renovar y transformar las industrias maduras existentes. Así, los nuevos paradigmas revitalizan nuevos servicios e industrias (Pérez, 1992, pp. 31-32).

Cuanto más se afirman las nuevas industrias y la nueva lógica en la espera productiva, tanto mayor es la presión que éstas ejercen en las instituciones para

que se adapten y tanto mayor es el potencial de crecimiento reprimido por su inercia. De modo que cuando se logra una buena correspondencia institucional y se desata finalmente el auge, muchos sectores e industrias, los nuevos y los renovados, están listos para emprender un proceso de rápido crecimiento, explotando cadenas de innovaciones sucesivas (Pérez, 1992, pp. 32-33).

Estas cadenas, a su vez, pueden ramificarse en nuevos sistemas y expandirse hacia nuevas actividades. Los recursos humanos y las exterioridades desarrolladas para los primeros productos de cada cadena y para las actividades más receptivas a la aplicación del paradigma hacen posible y facilitan avanzar hacia las menos receptivas. Este periodo de despliegue fácil y fluido de las posibilidades implícitas en un paradigma constituye la edad de oro del crecimiento (Pérez, 1992, p. 33).

Sin embargo, a la postre los mercados comienzan a saturarse, los productos y procesos se estandarizan, las largas familias de productos llegan al punto de agotamiento y las innovaciones incrementales en los procesos logran escasos aumentos de productividad. La experiencia acumulada en cada industria y en el mercado es tal que cada nuevo producto de la cadena alcanza la madurez con mayor rapidez que sus antecesores; lo mismo sucede con la incorporación de nuevas actividades. Como resultado de ello muchos productos, industrias y sistemas tienden a madurar aproximadamente en el mismo periodo, con lo que el paradigma arriba a la última fase de su ciclo de vida (Pérez, 1992, p. 33).

Como se indica en la ilustración 4, lo que dificulta tanto el ingreso de manera innovadora durante la fase de crecimiento del paradigma es el carácter cada vez más privado de la acumulación de experiencia y *know-how* de tipo tácito especializados, así como el creciente desarrollo en el seno de la empresa de conocimientos patentados o mantenidos en secreto (Pérez, 1992, p. 38).

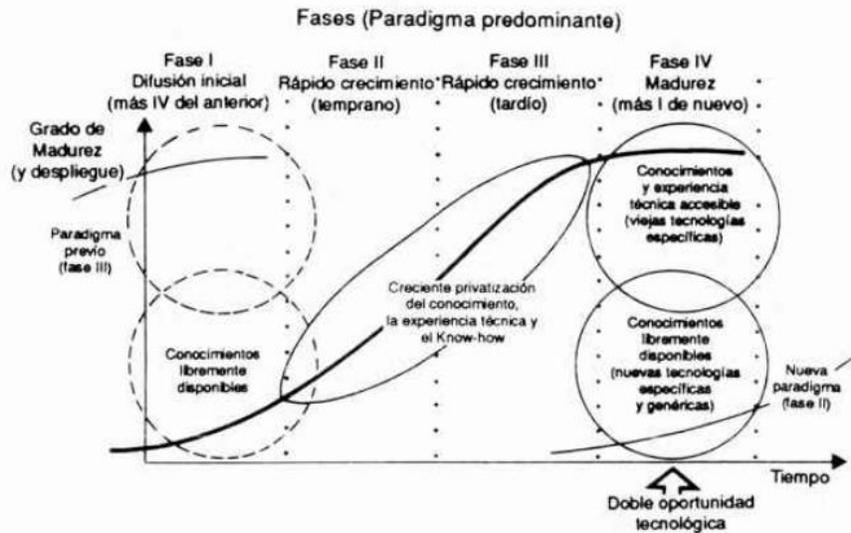


Ilustración 4. Oportunidades tecnológicas cambiantes.
Fuente: Pérez (1992, p. 38).

Esta acumulación de experiencia práctica o *know-how* dentro de las empresas durante la fase de crecimiento rápido levanta barreras de ingreso en unas industrias específicas tras otras. En el proceso se genera también experiencia en la interacción entre empresas, la cual se convierte en exterioridades para todas las empresas de ese país o esa región particular. De manera que la ventaja de los que van adelante se multiplica constantemente, ampliando la brecha con los que van a la zaga. La fase de crecimiento rápido de un paradigma impide con creciente fuerza el ingreso de nuevos participantes en el mercado (Pérez, 1992, p. 39).

(Pérez, 1992, p. 39) sostiene que “en periodos de transición tecnológica existe un conjunto muy abundante de oportunidades tecnológicas, que pueden contribuir a dar un salto hacia el desarrollo siempre que se cuente con el marco institucional apropiado”. De lo anteriormente expuesto se sigue que es en esta fase donde los sectores empresarial o público tienen mayor posibilidad de éxito para emprender una nueva revolución tecnoeconómica por productividad reversible A_{rev} o por eficiencia real $\eta_{p,n}^*$, con las mismas secciones que los paradigmas anteriores: una de difusión inicial, una de rápido crecimiento temprano, una de rápido crecimiento tardío y una de madurez.

Las naciones, además de considerar la evaluación de un mejoramiento productivo en lo que se refiere a la eficiencia termodinámica productiva, deben de estar conscientes de su posición en la quinta revolución tecnológica, dado que, por ejemplo, autores como (Sánchez, 2014, p. 11) dicen que la principal razón para automatizar no son eficiencia o flexibilidad, sino seguridad. Otros aspectos a tomar son alcance de la intervención, es decir, el nivel de automatización y el nivel de trabajo manual; los procesos específicos que van a ser automatizados y las variables.

En el sector automotor, han sido un reto los procesos de rediseño de planta para lograr una adecuada mezcla entre automatización y trabajo manual. (Sánchez, 2014) dice que la preautomatización considera las estrategias que se despliegan para hacer que una máquina cumpla un trabajo. Las actividades realizadas para preautomatizar facilitan el trabajo tanto para las máquinas como para la realización de procesos manuales y disminuye el tiempo de ubicación de las cosas. Algunas de las actividades dentro de esta etapa son:

- Acortar distancias para alcanzar las cosas.
- Colocar herramientas y piezas cerca del punto de trabajo.
- Rediseñar con el fin de facilitar el acceso a los elementos que se ubican en ellos.
- Diseñar dispositivos automáticos que faciliten la verificación de los procesos.

Automatización es, por otro lado, el proceso que permite que las máquinas realicen operaciones ordenadas a través del uso de dispositivos y sistemas para control de diferentes variables. Un proceso de automatización industrial es generado por la convergencia de tres tecnologías: mecánica, electrónica e informática (Sánchez, 2014, p. 11). Del presente trabajo de investigación, se sigue que una buena coordinación entre las actividades que vean por el incremento de la eficiencia productiva y los esfuerzos en torno al crecimiento mediante la

adaptación de tecnologías de vanguardia es una manera de ver el crecimiento de la productividad total de los factores y del bienestar social.

Capítulo V. Estudio de casos

V.1. Secado de subproductos de plantas de beneficio de aves en Colombia.

Para ejemplificar las aplicaciones de la termoeconomía, en esta sección, se presentan los puntos más importantes del estudio de (Silva Larrotta, 2015), quien realiza el desarrollo de una evaluación exergética a un proceso industrial de secado simple de subproductos de plantas de beneficio de aves ubicada en la Sabana de Bogotá, Colombia, a fin de establecer destrucción de exergía, costos exergéticos y valoración de combustibles alternativos.

El sistema se compone de un quemador principal de gas propano que tiene un consumo de 58.64 gal/h equivalentes a $6.16 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ cuya función es generar gases de combustión que son conducidos por una tubería hasta el secador de subproducto (hemoglobina) para deshidratarlo. Dicho subproducto ingresa a una tasa de 0.437 ton/h durante 8.5 horas por día. Los gases de combustión alcanzan la temperatura de 700 K al interior del quemador y durante su recorrido ingresan al secador a 440 K para salir a una temperatura final de 380 K y posteriormente ser tratados para su refrigeración. Como es necesario, la definición del ambiente de referencia (T_0, P_0) se trabajó con una temperatura ambiente T_0 de 290 K y una presión atmosférica P_0 de 80,000 Pa.

El análisis termoeconómico se desarrolló a través de la siguiente metodología:

1. Determinación de los flujos de exergías en las fases del proceso: entrada del combustible, quemador, secador y salida de los gases del secador. En este primer análisis se hizo uso de la primera y segunda ley de la termodinámica, considerando un flujo unidimensional y estacionario de los gases de combustión a través del sistema.
2. Determinación de los costos unitarios de los flujos exergéticos durante el recorrido por el sistema.

3. Determinación de los costos por unidad de tiempo de los flujos exergéticos establecidos.
4. Análisis de resultados.

Con las exergías de flujo calculadas se pudo realizar el balance exergético para establecer la destrucción de exergía durante el proceso:

Tabla IV. Balance de flujos exergéticos del proceso de secado simple				
Proceso	Flujo neto de entrada (kW)	Flujo cedido (kW)	Flujo destruido (kW)	Participación
Combustible de entrada	1516	-	-	100%
Energía entregada a los gases	-	368.25	-	24.2%
Exergía cedida en el secador	-	352.87	-	23.27%
Exergía destruida	-	-	794.88	52.4%

Fuente: Silva Larrotta (2015, p. 25).

Se obtuvo una participación porcentual de destrucción de exergía elevada superior al 50% que obedece principalmente a las siguientes razones:

1. Las temperaturas de operación del proceso son bajas frente a las temperaturas de la combustión del gas propano de manera que la elección del combustible no es la más adecuada. Tendría que evaluarse otro combustible más adecuado para el calentamiento de los productos del proceso.
2. El aporte exergético en el quemador es bajo frente al flujo exergético del combustible. Por entenderlo de otra manera podría decirse que el gas propano tendría la capacidad de llevar teóricamente los gases de combustión hasta un valor de 1,977 K y que a su vez con el descenso a la temperatura de referencia entregaría la máxima capacidad de trabajo para el consumo dado.

- No hay un mayor aprovechamiento del flujo exergético de salida de los gases de escape que finalmente están siendo transportados hacia la atmósfera.

La evaluación anterior se realizó con seis combustibles sin considerar las condiciones técnicas que demandaría la combustión particular para determinar si existía alguna diferencia significativa de flujos exergéticos. A continuación, los resultados:

Tabla V. Balance con otros combustibles				
Combustible		Exergía (PEMEX, 2004) (kJ/kg)	Flujo neto de exergía (kW)	Dstrucción de exergía
Gasolina	C_8H_{18}	46,650	1,684	66.68%
Diesel	$C_{12}H_{29}$	45,650	1,557.2	67.03%
Etanol	C_2H_6O	27,154	1,590.3	65.07%
Butano	C_4H_{10}	48,262.2	1,648.2	67.47%
Metanol	CH_4O	22,408	1,753.8	68.49%
Metano	CH_4	52,144.9	1,545.5	18.40%

Fuente: Silva Larrotta (2015, p. 27).

Como puede visualizarse en la tabla IV, persistió una destrucción de exergía que osciló entre el 18.4% y el 68.5% para el metano y el metanol respectivamente. Aunque la destrucción que presentó el gas propano (52.4%) es muy alta, también se observa que los demás combustibles tienen un compartimento muy similar entre ellos, más desfavorables, con lo que cobra fuerza la idea de elegir un energético de acuerdo con el propósito y no solamente por el poder calorífico, y de evaluar un nuevo sistema de secado de subproductos.

Con estos resultados, el autor insta que “el análisis exergético se constituye en una sólida herramienta para entender la dinámica energética de los procesos de la naturaleza y de los procesos artificiales”, (Silva Larrotta, 2015, p. 31). También menciona que el verdadero potencial de ahorro energético de un sector industrial no se puede valorar sino a través de un balance energético que

determinen las condiciones máximas de operación a partir del propósito de cada acción o proceso.

“Por medio del análisis termoeconómico es posible la cuantificación de intangibles contables y físicos representados en la destrucción de exergía causada por múltiples factores como: errónea elección de un combustible, de un mecanismo, de un lugar de operación, fallas de operación en los procesos, erróneos parámetros de operación, etc.”, (Silva Larrotta, 2015, p. 31).

V.2. Estudio de factibilidad de planta térmica de cogeneración en México.

Enseguida, se presentan los resultados del estudio de (Torres González et al., 2017), quienes evalúan una alternativa técnica de cambio de planta que produce y suministra vapor y energía eléctrica a un grupo de fábricas, para un uso eficiente de la energía mediante la cogeneración con ciclo combinado. La cogeneración produce de forma secuencial potencia y cierta transferencia de calor (o vapor de proceso) requerida para algún uso. Un objetivo de la cogeneración es desarrollar la potencia y la transferencia de calor usando un sistema integrado con un consumo de recursos menor al que se requeriría para producir individualmente cada uno de ellos (Moran & Shapiro, 2004, pp. 352-353).

Con la alternativa propuesta se satisfarían los requerimientos de vapor y potencia eléctrica para las fábricas, por lo que la planta ya no necesitaría el suministro de energía eléctrica de la red de distribución de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México. Se utiliza la metodología exergoeconómica para definir la factibilidad del proyecto. Primero, se calcularon los estados termodinámicos de los dos sistemas (planta actual y alternativa). Posteriormente se realizó el análisis exergético; se planteó la estructura productiva para obtener los costos exergéticos y exergoeconómicos, y se realizó un análisis comparativo de los parámetros exergoeconómicos.

La planta actual es un sistema de cogeneración que está conformado por 5 generadores de vapor, 2 turbogeneradores, 2 bombas y su condensador con su

respectivo sistema de enfriamiento. Esta planta produce 80.3 ton/h de vapor a una presión de 14 kg/cm^2 que se envían a las fábricas, de las cuales 25.3 ton/h a una temperatura de $334.62 \text{ }^\circ\text{C}$ se toman del vapor principal y 55 ton/h a $274.08 \text{ }^\circ\text{C}$ de una extracción de las turbinas de vapor. Además, la planta genera 8 MW de energía eléctrica que se mandan a las fábricas, éstas necesitan adicionalmente 13 MW para su funcionamiento que se toman de la red de distribución CFE; es decir, las fábricas requieren una potencia eléctrica total de 21 MW.

La temperatura y la presión del vapor sobrecalentado a la entrada de las turbinas de vapor es de $350 \text{ }^\circ\text{C}$ y 29.41 bar y la presión de condensación es de 0.19 bar. Las eficiencias isoentrópicas de las turbinas de vapor y de las bombas de vapor son 0.80 y 0.70, respectivamente. El combustible utilizado es gas natural, cuya composición volumétrica es: metano [0.9077], etano [0.0764], propano [0.0095], butano [0.0032] e isobutano [0.0032]. Las condiciones del estado muerto son de 20°C , 1.013 bar y 50% de humedad relativa.

La alternativa técnica propuesta también es un sistema de cogeneración; con ésta se satisfacen los requerimientos de vapor y de potencia eléctrica para las fábricas; es decir, la planta ya no necesitaría el suministro de energía eléctrica de la red de distribución de CFE. La alternativa cuenta con una planta de turbinas de gas con su caldera de recuperación de calor, 2 turbogeneradores, 2 bombas y su sistema de enfriamiento. De esta manera, se sustituyen los generadores de vapor de la planta actual por una planta de turbina de gas que genera la potencia eléctrica restante a ocupar por las fábricas y sus gases residuales se envían a la caldera de recuperación de calor que genera el vapor a usarse en el ciclo de vapor.

Las condiciones de operación en el ciclo de vapor se mantienen y la planta de turbina de gas usa como combustible gas natural con la misma composición antes descrita; la temperatura de los gases de combustión a la salida de la cámara de combustión es $1,300 \text{ }^\circ\text{C}$, la relación de presiones es 17.17, las eficiencias isoentrópicas del compresor y la turbina son ambas de 0.9 y la eficiencia de la cámara de combustión es de 0.98. Las turbinas de vapor generan 8 MW y la

planta de turbina de gas 68.5 MW; es decir, se tiene una generación de electricidad total de 76.5 MW de los cuales 21 MW se envía a los procesos en las fábricas, 108.42 kW a las bombas del ciclo de vapor y al sistema de enfriamiento por lo que se tiene un excedente de 55.39 MW.

Con la estructura productiva de las plantas se determina el recurso y el producto de cada componente. En base a esta información se calculan los valores de la eficiencia exergética y de las irreversibilidades. También se determinan los costos de operación exergéticos $CO = k_F^* \dot{I}$ y exergoeconómicos $COE = c_F \dot{I}$.

El costo exergoeconómico total de producción de vapor y de generación de electricidad en la planta actual considerando el costo de la electricidad consumida de la red de distribución de CFE es de 1,446.97 USD/h. Para la alternativa el costo exergoeconómico total de producción de vapor y electricidad es de 2,183.52 USD/h, aunque se tiene mayor producción de potencia eléctrica y por tanto un excedente.

A continuación se muestran los valores de la eficiencia térmica, eficiencia exergética, costes de residuo y los costos de operación de la planta actual y la alternativa.

Tabla VI. Valores comparativos de la planta actual y la alternativa								
Casos	\dot{W}_{motor} (MW)	η_{th} (%)	η_ϵ (%)	\dot{R}^* (kW)	Π_R (USD/h)	c_R (USD/GJ)	CO_{total} (kW)	COE_{total} (USD/h)
Planta actual	8	61.75	28.78	10791.13	154.49	42.85	149450.22	4214.87
Alternativa	76.394	67.900	51.41	12422.90	176.76	60.05	153118.07	0.6007

Fuente: Torres González *et al.* (2014, p. 13).

La planta actual genera una potencia eléctrica de 8 MW que represente el 38.09% de las necesidades de energía eléctrica en los procesos, que tiene una demanda de 21 MW. La alternativa propuesta genera 76.39 MW de potencia eléctrica con lo que se sigue cumpliendo con las necesidades de energía eléctrica en los procesos pero ahora se tiene un excedente de 55.39 MW que se envían a la red eléctrica de CFE.

La eficiencia térmica de la planta actual es de 61.73% con una eficiencia exergética baja de 28.78% en comparación con la alternativa. Con la implementación de la alternativa se incrementa la eficiencia térmica a 67.98% y la eficiencia exergética a 51.41%; es decir, se mejora el desempeño de la planta.

En la alternativa, el costo exergoeconómico del residuo aumenta con respecto a la planta actual. Esta situación es debida al aumento de residuos con la implementación de la unidad de turbinas de gas; es decir, en la planta actual se tiene un solo residuo y con la alternativa se tiene dos residuos: el residuo del ciclo de vapor y el residuo originado en la unidad de turbina de gas. El incremento en el costo exergoeconómico del residuo en la alternativa es de 22.27 USD/h, mientras, el costo exergoeconómico unitario del residuo también tiene un incremento de 17.2 USD/GJ.

La alternativa presenta un incremento de 3,667.85 kW en el costo de operación exergético. Por otro lado, el costo de operación exergoeconómico disminuye considerablemente a 0.6007 USD/h. Este último resultado indica la conveniencia de la implementación de la alternativa.

De acuerdo a los resultados obtenidos con el análisis exergoeconómico, la alternativa propuesta presenta una mejora con respecto a la situación actual de la planta. La mejora se traduce en una mejor eficiencia térmica (se incrementa en un 6.15%), un aumento en la eficiencia exergética (aumenta en un 22.63%), un ahorro en el costo de operación exergoeconómico de 4,214 USD/h y un ahorro en el costo exergoeconómico de producción del vapor a proceso de 44.91 USD/h y 80.54 USD/h.

El costo exergoeconómico de producción total de vapor a proceso y de electricidad de la alternativa se incrementa en un 736.55 USD/h, aunque se tiene un excedente de potencia eléctrica que se enviaría a la red eléctrica de CFE con la que se tendría un contrato tipo para compras de excedentes de acuerdo a la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica.

V.3. Simbiosis industrial de Kalundborg, Dinamarca.

Ahora se muestra el trabajo de (Costa Sorolla, 2011), quien se basa en la idea de aplicar la termoeconomía como herramienta de análisis en un ecoparque industrial y, concretamente, en el modelo de simbiosis industrial de Kalundborg, Dinamarca, que permita cuantificar los ahorros obtenidos.

El alcance del trabajo viene limitado por la información disponible sobre el modelo de simbiosis industrial de Kalundborg. Debido a su continua evolución y expansión, el ecoparque industrial ha alcanzado tal grado de madurez que hace que la realización de un análisis termoeconómico completo del mismo sea excesivamente compleja de abordar e incluso imposible sin contar con la colaboración de los actores principales, que son los que pueden aportar información necesaria. Por consiguiente, considerando los principales flujos intercambiados se optó por definir un caso de estudio simplificado, aunque riguroso y representativo, del modelo de simbiosis industrial para poder llevar a cabo el análisis termoeconómico.

La metodología seguida para la realización del trabajo se dividió en las siguientes fases:

1. Búsqueda bibliográfica.
2. Análisis de los flujos de materiales y energía.
3. Definición del caso de estudio.
4. Cálculo exergético mediante el software *EES*.
5. Análisis termoeconómico mediante el software *TAESS*.
6. Resultados y conclusiones.

En los ecosistemas naturales se pueden identificar cadenas alimenticias con productores y consumidores quienes, gracias a un metabolismo equilibrado, permiten que los ecosistemas perduren en el tiempo. Trasladar esta idea al sistema industrial permite maximizar la eficiencia de los procesos, logrando que los residuos puedan ser reutilizados generando un encadenamiento productivo.

Puesto que los agentes industriales se organizan generalmente en polígonos industriales, surge también el concepto de ecoparque industrial, definido como una comunidad de empresas que cooperan entre sí, compartiendo sus recursos (información, materiales, residuos, recursos humanos, energía, etc.) para alcanzar un beneficio económico y social. A su vez, se reducen los impactos sobre el medio ambiente, se obtiene una mayor competitividad y un menor consumo de recursos. Actualmente, el modelo de simbiosis industrial de Kalundborg está constituido por cinco participantes principales más otros diez participantes secundarios.

Tabla VII. Participantes de la simbiosis industrial de Kalundborg		
No.	Participante	Actividad
1	Asnaes	Central térmica de carbón con cogeneración.
2	Statoil	Refinería de petróleo.
3	Novo Group	Compañía farmacéutica y de biotecnología.
4	Gyproc	Fabricación de placas de yeso.
5	Municipio de Kalundborg	Sistema de calefacción central.
6	Kara/Noveren	Tratamiento de residuos.
7	RGS 90	Tratamiento de tierras contaminadas.
8	Inbicon	Fabricación de bioetanol.
9	Nordisk Aluminat	Fabricación de aluminatos.
10	Aalborg Portland	Fabricación de cemento y otros pavimentos.
11	Aluscan	Anodizado y cromado de metales.
12	Piscifactoría	Producción de salmón y trucha de mar.
13	Planta de fertilizantes	Fabricación de sulfatos.
14	Explotaciones ganaderas	Granjas de cerdos.
15	Explotaciones agrícolas	Cultivo de trigo y otras plantas.

Fuente: Costa Sorolla (2011, p. 9).

Los beneficios ambientales asociados a la simbiosis industrial están determinados por ahorros en el consumo de agua, combustible y materia prima; dichos ahorros conllevan disminuir los residuos generados así como las emisiones de contaminantes.

Tabla VIII. Principales beneficios ambientales de la simbiosis industrial de Kalundborg		
		Ahorro anual
Agua	Subterránea	1,900,000 m^3
	Superficial	1,000,000 m^3
Combustible	Petróleo	20,000 t
	Carbón	30,000 t
Materia prima/residuo	Ceniza	200,000 t
	Yeso	80,000 t
Emisiones evitadas	SO_2	25,000 t
	CO_2	175,000 t

Fuente: Costa Sorolla (2011, p. 14).

En general, es complejo determinar todos los beneficios globales de la simbiosis industrial, puesto que muchos de los flujos presentes en el ecosistema industrial generan un doble beneficio. En el caso de los flujos de residuos, su valorización conlleva por un lado evitar la eliminación de dicho residuo, y por el otro se evita el consumo de la materia prima, así como de todos los recursos asociados a la obtención de la misma, que sería necesario si no se llevara a cabo la valorización.

En el caso de los flujos energéticos, como el gas excedente de la refinería o la energía térmica residual de la central, en origen conlleva evitar su disipación al medioambiente, mientras que para los receptores repercute en un ahorro sustancial de combustible. En cuanto a los flujos hídricos, el principal beneficio ambiental alcanzado es el ahorro en el consumo de agua, focalizado en sus inicios en la sustitución de agua subterránea por agua superficial, y más tarde en la reutilización.

La aplicación de la termoeconomía al modelo de simbiosis industrial de Kalundborg precisó de la definición de un caso de estudio sobre dicho modelo para permitir su caracterización en términos de exergía. En ese sentido, la información técnica recopilada sobre los flujos intercambiados limitó el alcance del caso de estudio establecido. Sin embargo, tras una extensa búsqueda bibliográfica, se elaboró un caso de estudio que incluyó los flujos más representativos de la simbiosis industrial de Kalundborg.

El caso de estudio gira en torno a la central térmica, pues representa el corazón de la simbiosis industrial, y tiene en consideración las integraciones principales en las que ésta participa:

1. Gas excedente. Suministro de gas excedente de la refinería que anteriormente se quemaba en antorchas para su aprovechamiento en la caldera de la central térmica. Sustituye parte del carbón consumido en la central.
2. Vapor de proceso. Extracción de vapor en la turbinas de la central térmica para su utilización en procesos productivos en Novo Group y Statoil.
3. Vapor *district heating*. Extracción de vapor en las turbinas de la central térmica para el abastecimiento del sistema de calefacción central de la ciudad de Kalunborg.
4. Agua caliente. Aprovechamiento de agua de mar caliente a baja temperatura procedente del condensador de la central térmica en la piscifactoría.
5. Cenizas. Utilización de las cenizas y escorias generadas en la combustión de carbón de la central térmica como materia prima, en sustitución del clínker, para la fabricación de cemento.
6. Yeso. Utilización del yeso generado en el proceso de desulfuración de los gases de combustión de la central térmica como materia prima en la fabricación de placas de yeso. Sustituye la importación de yeso natural desde España.

A fin de evaluar el efecto que tiene la simbiosis industrial en el ahorro de recursos, el caso de estudio definido se divide en un caso base y un caso alternativo. El caso base simula la situación referente a la simbiosis industrial con las seis integraciones consideradas; mientras que el caso alternativo simula un situación ficticia donde no existe integración entre las partes de modo que los flujos simbióticos son sustituidos por otros obtenidos mediante procesos convencionales. Es decir, el gas excedente se quema en una antorcha originando

un consumo de carbón adicional en la central, las integraciones de vapor y agua caliente se sustituyen por calderas de gas natural, las cenizas se sustituyen por un clínker producido en un horno y el yeso es importado desde España mediante transporte marítimo.

En la tabla IX se muestran los costos exergéticos unitarios del producto de cada componente que se obtuvieron para los dos casos considerados:

Componente	Con integración	Sin integración
1. Separador + desulfuración	1.0054	1.0076
2. Caldera	2.3591	2.5550
3. Turbina	2.6676	2.8891
4. Caldera vapor de proceso	2.3591	2.5636
5. Caldera <i>district heating</i>	2.3591	4.8229
6. Caldera piscifactoría	2.3591	18.1714
7. Horno clínker	1.0054	3.8592
8. Transporte yeso	1.0054	5.7657
9. Antorcha	1.0000	1.0000

Fuente: Costa Sorolla (2011, p. 20).

Según este investigador, para averiguar la contribución real de cada componente al ahorro generado, se recurre a fijar el foco de atención en el consumo de recursos asociado al mal funcionamiento de cada componente, denominado coste del mal funcionamiento. A continuación se muestra una forma de descomponer el impacto en el combustible global, la cual se basa en el coste del mal funcionamiento, variación de productos y flujos de residuos (tabla IX).

Las contribuciones más llamativas son debidas a los componentes siguientes:

- Calderas auxiliares. Demuestran en términos de impacto en combustible que la producción autónoma de energía térmica es menos eficiente que el abastecimiento desde la caldera de la central térmica. Además, puede comprobarse que cuanto menor exergía específica tenga la energía térmica generada, mayor impacto en combustible conlleva. Es por ello que la

caldera de vapor de proceso apenas incrementa el impacto en combustible, mientras que la caldera de la piscifactoría lo hace notablemente.

- Horno de clínker. El horno de clínker tiene asociado un impacto en combustible originado fundamentalmente por la sustitución de su producto original, las cenizas, por otro de mayor exergía como el clínker. También contribuye en su impacto en combustible el consumo de recursos externos que conlleva la producción del clínker.
- Antorcha. Su impacto en combustible es el que más peso tiene de todos, y es consecuencia de la generación de un residuo de elevada exergía que debe ser disipado al sustituir el aprovechamiento del gas excedente de la central de por un consumo adicional de carbón.

El análisis termoeconómico de Costa Sorolla sobre el caso de estudio basado en el ecoparque industrial de Kalundborg aporta una serie de resultados que refuerzan la idea de que cada una de las integraciones analizadas es más ventajosa que la alternativa convencional. Por tanto, la conclusión principal que el autor extrae es que las integraciones de procesos en la industria son eficaces y eficientes tanto en términos económicos, energéticos como ambientales. Prueba de ello es la disminución del coste físico de los productos, el ahorro de materia prima y la disminución de los residuos generados.

Tabla X. Análisis del impacto en combustible basado en el coste del mal funcionamiento					
Componente	MF [GWh/año]	MF^* [GWh/año]	$c_p^e \Delta \mathcal{P}_s$ [GWh/año]	$c_p^e \Delta \mathcal{P}_r$ [GWh/año]	ΔF_T [GWh/año]
1. Separador+ desulfuración	24	24	0	0	24
2. Caldera	9	16	0	0	16
3. Turbina	0	0	0	0	0
4. Caldera vapor de proceso	302	38	0	0	38
5. Caldera <i>district heating</i>	244	157	0	0	157
6. Caldera piscifactoría	240	221	0	0	221
7. Horno clínker	62	62	146	0	208
8. Transporte yeso	10	10	0	0	10
9. Antorcha	0	0	0	842	842
TOTAL	892	527	146	842	1,514

Fuente: Costa Sorolla (2011: 24).

V.4. Sector energético de la República Mexicana.

A continuación, se enuncian algunos de los resultados de (Pacheco Rojas, 2016), quien toma como fuente de información el Balance Nacional de Energía de México que publica la Secretaría de Energía para mostrar cómo el valor termodinámico de los flujos de exergía discurre y se disipa con el paso de los procesos distintivos de las actividades productivas y de servicios en el país. El objetivo de un trabajo de este tipo (Pacheco Rojas, 2016, p. 52) es una herramienta para la futura toma de decisiones a nivel empresarial o público que:

- Maximicen la energía disponible para las actividades humanas; minimicen la cantidad de combustibles empleados por unidad de producción.
- Optimicen procesos administrativos.
- Reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero.

Gracias a un estudio completo del comportamiento de la energía en una macroeconomía, incluyendo la aplicación de los principios de la segunda ley de la termodinámica al estudio de la eficiencia en las transformaciones y uso de la

exergía a un macronivel de agregación, es posible concluir que la eficiencia exergética total del sistema energético nacional (incluyendo el comercio internacional de energía) es de 39.0%; sin considerar esta clasificación del comercio, de 21.1% (Pacheco Rojas, 2016, pp. 57-66).

El 45.7% de la energía que se consume se emplea en los transportes. Del total de energía en el sector transporte, el 91.75% es consumido por autotransportes; es decir, para las personas o mercancías que se mueven por medio de autotransportes que utilizan como fuente de energía algún combustible fósil, la exergía de esos ciclos estará dada por $W = Q(1 - T_0/T)$, con lo que puede apreciarse que este proceso está limitado por condiciones físicas, tecnológicas y económicas. Éste es el proceso que más exergía destruye. El sector industrial consume sólo el 32.59% de la exergía nacional. El sector residencial consume el 18.40% y el agropecuario sólo el 3.23%, lo cual refleja en parte la estructura económica del país.

Pacheco Rojas también menciona que los principales destructores de exergía en México son los centros de transformación de energía primaria y secundaria, con 1,622 PJ de exergía perdida anuales (23% del total); generalmente son ciclos de potencia que utilizan como fuente de energía algún combustible fósil. El siguiente destructor de exergía es el consumo en transportes: 1,604 PJ que representa el 23% del total. Las ramas industriales destruyen 1,026 PJ de exergía (15% del total). El total de exergía destruida es de 6,991 PJ, lo cual corresponde a la energía que se disipa al ambiente y que contribuye a un nivel relativamente elevado de efecto invernadero por unidad de producción.

En lo que se refiere al costo exergoeconómico, Pacheco Rojas encontró que el costo de producción de energía primera es de 7,658.3 pesos/seg. El costo exergoeconómico de la entrada de la energía primaria del centro de transformación es 5,520.3 pesos/seg. El costo exergoeconómico del flujo de la producción de energía secundaria es de 14,190 pesos/seg. El costo exergoeconómico del flujo de importación secundaria es de 14,446 pesos/seg. El costo exergoeconómico del flujo de fuente secundaria es 27,785 pesos/seg.

Al comparar los costos exergoeconómicos de las diferentes formas de transporte, resalta el alto costo de los autotransportes con 10,374 pesos/seg, en comparación con el transporte eléctrico de 60.03 pesos/seg. También se observa una fuerte diferencia entre el consumo final residencial de 3,724 pesos/seg en comparación con el sector público de 177 pesos/seg, las industrias del acero de 1,259 pesos/seg y la industria química de 423 pesos/seg.

A propósito del sector automotriz, en las dos últimas décadas ha habido una tendencia alarmante en el incremento del uso del automóvil: 6.5 millones a 20.8 en 2010 (ITDP, 2013, p. 1). Ha ido de la mano de los kilómetros-vehículo recorridos que se han triplicado de 106 millones de 1990 a 339 millones en 2010; tasa de crecimiento de 5.3% anual. Esto implica aumento de todos los impactos negativos generados por el automóvil, sobre todo en gases de efecto invernadero, contaminación, obesidad, accidentes, congestión y ruido.

Pacheco Rojas insiste en el impulso a la modernización del sector industrial, pues es de gran importancia para la sustentabilidad, para lo cual se debe inducir a la industria establecida a que tome acciones técnico-operativas para optimizar el funcionamiento de sus equipos y procesos; así mejoraría su eficiencia, para reducir el consumo de energía y la emisión de contaminantes como consecuencia. En teoría, se puede lograr una reducción en el consumo de energía entre 15 y 37% por eficiencia energética.

V.5. Modelo toyotiano de producción automotriz.

A causa de la asimetría de la información, que ocurre cuando en el mercado se suministra poca información acerca de los bienes en circulación (Stiglitz, 2000, pp. 99-100) sería difícil establecer elementos sólidos que defiendan el argumento de que el ahorro energético es una causa potencial para la proliferación de los diversos modelos productivos del sector automotriz a través del tiempo. No obstante, existen indicios que dan prueba tentativa de este hecho.

Se ha dicho que el crecimiento económico desde finales del siglo XVIII ha atravesado por cinco etapas distintas, asociadas con cinco revoluciones

tecnológicas sucesivas. Esto ha sido captado por la imaginación popular, la cual designa los periodos relevantes según las tecnologías más notables. Revolución Industrial, por ejemplo, fue el nombre dado a la irrupción de la máquina y la inauguración de la era industrial, hasta que a mediados del siglo XIX comenzó a ser común que la gente ahora se refiriera a su tiempo como la era del vapor y los ferrocarriles (Pérez, 2004, p. 34).

La cuarta revolución, también llamada la era del petróleo, el automóvil y la producción en masa, fue liderada por Estados Unidos, cuando salió al mercado el primer modelo-T de la planta de Ford en Detroit en 1908. La tercera revolución, la era del acero, la electricidad y la ingeniería pesada, también había surgido en EUA; pero la anterior, la era del vapor y los ferrocarriles, comenzó en Inglaterra y se difundió hacia Europa y EUA. Esta situación es importante porque, aunque las oleadas de desarrollo que impulsan las revoluciones tecnológicas en el largo plazo son fenómenos mundiales, la propagación del cambio ocurre en forma gradual y se dirige desde el núcleo hacia la periferia (Pérez, 2004, pp. 34-35).

El modelo fordiano era un modelo que implementó la estrategia de producción por volumen y sólo fue pertinente cuando la distribución de los ingresos fue relativamente igualitaria, o diferenciada en solo dos o tres grandes grupos sociales muy homogéneos, primero a escala nacional y después internacional (Boyer & Freyssenet, 2001). Respondía a las exigencias de esta estrategia mediante (Boyer & Freyssenet, 2001, p. 58):

- Una política de producto que apuntaba a un modelo estándar al precio más accesible al conjunto de la población, o específico al cliente promedio de cada gran segmento de mercado.
- Una organización productiva fuertemente centralizada, secuencialmente integrada en línea continua, mecanizada y en cadencia basada en la predeterminación y la estandarización de operaciones elementales distribuidas entre los puestos de trabajo de manera independiente e indiferenciada para saturar el tiempo de ciclo.

- Una relación salarial que aseguraba a los obreros sin la calificación requerida, un salario fijo no vinculado con el rendimiento, cuyo poder adquisitivo progresaba regularmente, para una jornada diaria de trabajo determinada.

El modelo fordiano funcionaba gracias a un compromiso de gobierno de empresa, establecido principalmente entre los dirigentes y los sindicatos, y basado en el crecimiento del poder adquisitivo de los salarios a cambio de la aceptación de la organización del trabajo (Boyer & Freyssenet, 2001, p. 51). Sin embargo, a pesar de la idea de Henry Ford de la necesidad de aumentar regularmente los salarios para ampliar constantemente la demanda, su empresa encontró trabas, antes de que se cumplieran nueve años después del lanzamiento del Ford T y menos de tres años después de la generalización de la líneas de montaje (Boyer & Freyssenet, 2001, p. 56).

Esta crisis se originó por la ausencia de las condiciones necesarias para la viabilidad duradera de una estrategia de volumen. La demanda homogénea y creciente, responsable del éxito del Ford T, existió en Estados Unidos sólo por el tiempo que duró el desarrollo y enriquecimiento relativo de las categorías sociales independientes y asalariadas superiores, antes de que sus ingresos y necesidades se diferenciaron y que se inclinaron hacia vehículos correspondientes a la evolución positiva de la situación económica y social (Boyer & Freyssenet, 2001, p. 56).

Los grandes y pesados autos de Ford, consumidores de gasolina, fueron descalificados, y la masa de asalariados no había podido reemplazar sus vehículos debido a la ausencia de un aumento nacionalmente coordinado de su poder adquisitivo (Boyer & Freyssenet, 2001, pp. 59-60). De igual manera, la desaceleración del crecimiento de la productividad y los choques monetarios y petroleros de los sesentas y setentas no pudieron ser resistidos ni por la estrategia de volumen y diversidad de General Motors, representativa de los treinta años gloriosos (Boyer & Freyssenet, 2001, p. 73).

Sólo la reducción de costos pudo generar ganancias para Taiichi Ohno, ingeniero de fabricación al que se le atribuye la paternidad del sistema de producción de Toyota, mediante una producción basada en el volumen, la diversidad y la calidad. La estrategia de reducción permanente de costos de Toyota consiguió obtenerse de diferentes maneras: tanto por la utilización de máquinas más rápidas, precisas y especializadas que permitían disminuir tiempos de formación, como por la eliminación del derroche (mano de obra, materia, energía, herramientas, inversión) (Boyer & Freyssenet, 2001, p. 77).

Sería difícil realizar un estudio amplio sobre el grado en que el ahorro energético pudo permitir al modelo toyotiano establecerse como la empresa líder en el sector automotriz, contra la gran barrera que significaban los precursores de la era del petróleo, Ford y General Motors, a pesar de los años noventa en que Japón cayó en un marasmo económico. No obstante, lo que se sigue de esta tesis es que la ampliación de la función de producción del sistema toyotiano pudo tener como causa un aumento de la productividad total reversible de sus factores A_{rev} por la introducción de nuevas tecnologías al proceso productivo, o un aumento de su eficiencia térmica productiva (y la de sus productos) $\eta_{p,n}^*$ por la mejora de la maquinaria ya existente.

El procedimiento técnico y social que conlleva el ahorro exergético brinda elementos en torno al debate del historiador alemán Max Weber contra la tesis de Wilhelm Ostwald, premio Nobel de Química en 1909, de que el desarrollo de la cultura va parejo al aumento de la eficiencia de la transformación de energía (Martínez Alier & Schlüpmann, 1991, pp. 225-235): efectivamente, es energéticamente más barato tejer una pieza de tela a mano que a máquina, pero el aumento de la eficiencia termodinámica real sí tiene su contribución en incremento de la productividad total de los factores de las economías, lo que puede visualizarse en el caso de Toyota.

Esta tesis pretende ser también una contribución a la económica ecológica, que ve a la economía como un flujo entrópico de energía y materiales que transporta recursos agotables exteriores al sistema económico, y que genera

residuos, como calor desaprovechado, materiales no reciclables, etc). Busca también ser el apoyo analítico de economistas, como Georgescu-Roegen, que pretenden cuantificar el proceso económico industrial, que disipa enormes cantidades de materias primas y energía, análogamente a los procesos termodinámicos, de tal forma que se pueda medir el crecimiento entrópico, frenarlo con procesos de reciclaje o, en todo caso, establecer una base racional para calcular los costos de nuestra sociedad de consumo.

V.6. La innovación en Estados Unidos y la manufactura mexicana.

Los estudios en torno a la política industrial para una economía resultan ser siempre necesarios, en vista de que a veces los gobiernos deciden fomentar determinadas industrias, financiando la investigación en esas áreas. Existe un gran debate en torno a este tipo de medidas para impulsar la industria de una nación. Por ejemplo, los críticos afirman que el Estado tiene un pésimo historial de selección de sectores vencedores, debido a que no le mueven los beneficios, por lo que argumentan que no debe dedicarse a dirigir la economía (Stiglitz, 2000, pp. 384-385).

En sus recientes programas de tecnología, los Estados Unidos han tratado de aprender de sus errores pasados: para mejorar los incentivos han puesto el énfasis en los proyectos de colaboración, en los que el sector privado pone al menos el 50% de los costos; han concedido ayudas con criterios competitivos, con evaluaciones de expertos externos y con proyectos en una amplia variedad de áreas que compiten entre sí. Y han establecido sistemas de revisión continua que permite poner fin a los proyectos que no tienen éxito. Paradójicamente, aunque parece que estas reformas han dado resultado, en Estados Unidos también han minado la ayuda a los programas de investigación tecnológica: los grupos de presión consideran que ya no son muy rentables, por lo que dedican pocos recursos para conseguir que se aprueben (Stiglitz, 2000, p. 385).

Los defensores de la ayuda pública a la tecnología alegan que el Estado tiene en realidad un historial muy bueno de selección de vencedores, lo que no

quiere decir que no haya financiado también a perdedores (Stiglitz, 2000, pp. 384-385). A través de la presente tesis de licenciatura, se llega a inferir que el éxito de la inversión en investigación y desarrollo de los gobiernos dependerá de la complejidad del estudio de causas y efectos, así como de costos y beneficios, que trae consigo la introducción de un innovador bien de capital que mejore la productividad total de los factores y modifique la estructura productiva de los países. Dada la fuerte relación entre la teoría del productor y la termoeconomía, el análisis de la segunda ley en la productividad y el crecimiento económico de los agentes resulta ser de suma relevancia.

Política pública es un término que literalmente se refiere a las medidas instrumentadas por el gobierno. “Política” se refiere al proceso decisional, al diseño y a la evaluación de las medidas gubernamentales y “pública” alude al interés público de los ciudadanos. Con mayor precisión se afirma que la política pública se orienta a la solución de problemas en el marco del interés público (Ayala Espino, 1996, p. 39). La demanda de movilidad, por ejemplo, es uno de los requisitos básicos para el éxito de los proyectos urbanos en términos de eficiencia y costo beneficio (ITDP, 2013, p. 21). Es, por tanto, recomendable el establecimiento público de criterios de diseño y zonificación y planificación urbana, dado que es del interés colectivo.

La política pública industrial es, entonces, facultad de cada uno de los ciudadanos de una urbe, por razón de ser la actividad productiva la obra que brinda a los individuos bienestar económico. A propósito de la política industrial en México, la definición de la estrategia de la liberalización para promover las exportaciones a finales de 1987 había producido una generalizada falta de incentivos para el crecimiento económico. Así, la industrialización, inicialmente orientada hacia las exportaciones, se había revertido de forma paradójica en una industrialización orientada hacia las importaciones. Las prioridades macroeconómicas de la estrategia de la liberalización habían tenido un impacto negativo en la manufactura, así como en otras actividades productivas (Dussel Peters, 1997, pp. 255-256).

Además de la liberalización de las importaciones, el gobierno mexicano había requerido atraer inversión extranjera para estabilizar la balanza de pagos, lo cual había resultado en altas tasas de interés reales. En forma similar, el tipo de cambio sobrevaluado había sido un desincentivo para los desencadenamientos hacia atrás de las inversiones en el sector manufacturero (Dussel Peters, 1997, p. 256)

Dentro de este contexto macroeconómico adverso a la manufactura, en general, el gobierno había preferido no generar incentivos para la manufactura a nivel o producto hasta 1994. La política industrial desde 1988 se había caracterizado por una falta de estrategia industrial y de desarrollo a largo plazo. Bancomext y Nacional Financiera, las principales instituciones de apoyo a las exportaciones, se habían convertido en bancos de segundo piso para la mayoría de sus clientes y hasta 1992 sólo concedían créditos a tasas de interés de mercado (Dussel Peters, 1997, p. 256).

La estrategia de la liberalización y el periodo de crecimiento de 1988-1992 había reflejado cambios estructurales importantes que se habían llevado a cabo en el sector manufacturero en México y que tendrían un profundo impacto en el régimen de acumulación del futuro. La manufactura había promovido tasas de crecimiento promedio anual (TCPA) relativamente altas con respecto al PIB en 1988-1992, aunque significativamente menores a las de los periodos de auge previos. Cabe destacar, además, que las tasas de crecimiento de la productividad del trabajo y el capital, así como los crecientes flujos de inversión directa extranjera, son algunos de los éxitos más notables para este periodo (Dussel Peters, 1997, p. 257).

Sin embargo, a un nivel más desagregado, han existido cuatro problemas de la manufactura desde la estrategia de liberación durante un periodo de crecimiento: su heterogeneidad, su concentración y carácter excluyente, así como una significativa tendencia a perder sus encadenamientos hacia atrás. Así, uno de los aspectos más relevantes de la manufactura ha sido su incapacidad de integrarse a la economía nacional durante un periodo de crecimiento; por el

contrario, las importaciones masivas y la disminución de los encadenamientos hacia atrás han provocado el relativo carácter de enclave del sector (Dussel Peters, 1997, p. 257).

Para elevar la productividad del país, el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 había establecido como una de sus estrategias transversales implementar el Programa para Democratizar la Productividad (PDP) 2013-2018, que había definido 5 objetivos rectores (Gobierno de la República, 2017):

1. Promover un uso eficiente de los factores de la producción de la economía al facilitar la movilidad de los factores a sectores económicos más productivos que permitan incrementar el ingreso promedio del país.
2. Elevar la productividad de los trabajadores, de las empresas y de los productores del país, al elevar las inversiones en capital humano.
3. Fortalecer el ambiente de negocios en el que operan las empresas y los productores del país, mediante mayor certidumbre.
4. Establecer políticas públicas específicas que eleven la productividad en las regiones y sectores de la economía, a través de ventajas comparativas entre regiones e industrias.
5. Fortalecer el proceso de diseño, instrumentación y evaluación de las políticas públicas para orientarlas a elevar y democratizar la productividad, por medio del fortalecimiento del marco institucional.

El PDP 2013-2018 no contempla el mejoramiento de la productividad nacional por medio del gasto que lleve a la investigación y el desarrollo de capital productivo de menor derroche exergético. Tampoco hace alusión a las técnicas que brinda la termoeconomía ni el análisis de la segunda ley de la termodinámica; mucho menos hace relación entre el uso eficiente de los recursos energéticos y materiales, y el crecimiento económico.

Los indicadores utilizados para medir el logro de estos objetivos que tienen una mayor relación con el estudio de la eficiencia de los procesos productivos planteado en el presente trabajo de investigación es la Inversión Nacional en

Ciencia, Tecnología e Innovación como porcentaje de PIB, y el Índice de la Productividad Total de los Factores (anual), cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XI. Resultados de indicadores seleccionados del Programa para Democratizar la Productividad 2013-2018						
Nombre	Línea base	2013	2014	2015	2016	Meta 2018
Inversión Nacional en Ciencia, Tecnología e Innovación como porcentaje del PIB	0.44% (2012)	0.50%	0.54% ^e	0.54% ^e	0.54% ^p	1.00%
Índice de la Productividad Total de los Factores (anual)	100 (2012)	99.3	99.2	99.2 ^p	ND	106

Fuente: Gobierno de la República (2017: 17, 32). ^e: cifras estimadas. ^p: cifras preliminares.

La inversión en Ciencia y Tecnología no ha estado logrando la tendencia deseada. De este trabajo de investigación se sigue que el gasto en investigación en energía para la mejora de los procesos productivos puede lograr retornos económicos positivos; sin embargo, la tabla XI nos indica que poco se ha tomado en consideración esta propuesta. También puede observarse que la productividad total de los factores, lejos de mejorar, sigue un camino con tendencia negativa.

Las actividades industriales y productivas de una economía están relacionadas con el término de capital productivo, que engloba las motivaciones y el comportamiento de los agentes que generan riqueza nueva, produciendo bienes o prestando servicios (incluyendo transporte, comercio y otras actividades habilitadoras). Por definición analítica, esos agentes hacen esto con dinero prestado por el capital financiero y luego comparten la riqueza generada. Cuando utilizan su propio dinero entonces realizan ambas funciones. Su propósito como capital productivo es producir para ser capaces de producir más (Pérez, 2004, p. 106).

Estos capitales son esencialmente constructores y su objetivo es acumular cada vez mayor capacidad de generación de ganancias, mediante el crecimiento logrado a través de inversiones en innovación y expansión. Pueden ser propietarios –gerentes- o ser empleados como gerentes y directores. Su poder proviene del poder de esas empresas específicas y su riqueza personal dependerá del éxito de sus actividades como productores. En este caso, será importante distinguir claramente entre el proceso mismo de generación de riqueza y los mecanismos habilitadores, como las finanzas, cuya influencia lo posibilita y moldea la distribución de sus resultados (Pérez, 2004, p. 106).

En contraste, la actividad financiera está asociada al capital financiero, que representa los criterios y el comportamiento de los agentes que poseen riqueza bajo la forma de dinero y otros valores de papel. En esa condición, ejecutarán las acciones que tienden a incrementar esa riqueza. En el proceso, pueden adquirir depósitos, acciones, bonos, petróleo a futuro, derivados, diamantes o cualquier otra cosa. Pueden recibir intereses, dividendos o ganancias de capital, pero, al final, cualquiera sea el medio utilizado, el propósito continúa siendo tener riqueza en forma de dinero y hacerlo crecer (Pérez, 2004, p. 105).

Para lograr este propósito, usan los servicios bancarios, implementan los contratos y, en general, personifican el empeño por hacer crecer la riqueza de papel. Es esa conducta de los intermediarios cuando cumplen su función de hacer dinero con dinero lo que se puede observar y analizar como comportamiento del capital financiero. En esencia, el capital financiero sirve como agente de reasignación de recursos y distribución de riqueza (Pérez, 2004, p. 105).

Siempre que las sociedades vean por el mejoramiento de sus condiciones de vida a través del desarrollo y evolución de sus técnicas de producción, su política pública deberá de estar encaminada hacia las ciencias y disciplinas de la industria, en concreto de la economía de la productividad y la termoeconomía, por motivos de su relevancia teórica y práctica. Ya sea que los gobiernos apoyen al capital productivo o financiero, es importante que todos los países tengan un buen conocimiento de las condiciones de su industria y comercio. No habría que olvidar,

siguiendo las ideas de (Wall, 1997, p. 204), que la ecología humana debe de ser parte de toda educación, y que necesitamos una mejor perspectiva de nosotros mismos y nuestra civilización para el desarrollo sostenible.

Capítulo VI. Impactos macroeconómicos de la expansión exergetica

VI.1. El modelo del ciclo económico real.

Se toma el trabajo relacionado con la teoría del ciclo económico real del capítulo 11 de (Cervantes Jiménez, 2014) para analizar los impactos macroeconómicos de un choque exergetico. En dicho modelo, se interrelacionan cuatro macromercados: bienes, trabajo, dinero y crédito. Desarrolla los microfundamentos de la macroeconomía; es decir, parte de la elección de los consumidores y productores y generaliza el resultado trasladándolo al ámbito de la macroeconomía, lo que es consistente dado que la macroeconomía es el resultado de la suma de acciones de todos los agentes que constituyen una economía, pero con sus particularidades (Cervantes Jiménez, 2014, p. 337).

Los microfundamentos parten de la conducta de un agente con dos papeles. Por una parte, la economía doméstica cumple las funciones de consumidor, ahorrador, inversor y oferente de trabajo. Por otro lado, el productor cumple las funciones de productor y demandante de trabajo (Cervantes Jiménez, 2014, p. 337).

Los supuestos simplificadores del ciclo económico real son los siguientes (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 337-338):

1. Agentes optimizadores. Los consumidores eligen su consumo maximizando su utilidad, sujetos a su restricción presupuestaria y los productores eligen su volumen de producción minimizando el coste sujetos a la restricción tecnológica.
2. Mercados competitivos. Los mercados de bienes y factores de la producción son homogéneos. Los consumidores y productores son aceptadores de precios. Hay libre entrada y salida de empresas, pero la información es imperfecta.
3. Enfoque de equilibrio general. Los productores producen en la frontera de posibilidades de producción y realizan intercambios mutuamente beneficiosos. Los precios relativos son flexibles y los mercados se vacían

cuando las relaciones técnicas de sustitución de los productores se igualan con la relación marginal de sustitución de los consumidores y con el precio relativo de los bienes.

4. Enfoque intertemporal. La elección de consumidores y productores considera el tiempo. Por ejemplo, el consumidor evalúa su consumo presente respecto a su consumo futuro. El enfoque intertemporal es muy importante porque establece restricciones a la economía a lo largo del tiempo.
5. Hipótesis de expectativas racionales. Como la información es imperfecta, los agentes generan sus expectativas subjetivas con base en la hipótesis de expectativas racionales; es decir, incorporan la información disponible relevante para la toma de sus decisiones.

VI.2. La elección del consumidor y el productor.

Por ahora se supondrá que existe únicamente un agente económico, un tipo de unidad económica que contiene la combinación de economía doméstica y una empresa: la economía doméstica combina las unidades de consumo y de trabajo (como factor de la producción) y la empresa combina unidades de producción y contratación de mano de obra (Cervantes Jiménez, 2014, p. 338).

Se supone que el bien producido es perecedero, por lo que no puede almacenarse de un periodo a otro, prescindiendo de las existencias de bienes, cuya dotación inicial se supone nula. La función de producción del agente i -ésimo es:

$$Y_t = zf(N_t)$$

en donde la cantidad de bienes producidos Y_t dependerá del esfuerzo laboral medido en horas N_t y de un parámetro tecnológico z que, sin pérdida de generalidad, involucrará un *stock* de capital K , una eficiencia termodinámica productiva $\eta_{p,n}^*$ y una productividad total reversible de factores A_{rev} constantes en el periodo t (Cervantes Jiménez, 2014, p. 338).

El parámetro z incorpora los eventos que modifican el volumen de producción para determinado nivel de esfuerzo laboral. Entre las causas, se encuentran la variación en las condiciones del entorno, la modificación de los precios relativos de las materias primas y su disponibilidad, los cambios en las tasas impositivas, la modificación en las preferencias de los individuos, factores climatológicos y ambientales, la regulación del gobierno y, por supuesto, los choques tecnológicos positivos y negativos, como aquellos involucrados con la expansión y contracción exérgicas de la economía (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 338-339).

La función de producción cumple con las condiciones de Inada, a saber:

$$\lim_{N \rightarrow 0} zf'(N_t) = \infty \quad \dots \quad (1)$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} zf'(N_t) = 0 \quad \dots \quad (2)$$

La condición 1 establece que la pendiente de la función de producción o el producto marginal del trabajo es elevado (tiende al infinito) cuando el esfuerzo laboral es suficientemente pequeño (tiende a cero) y la condición 2 indica que el producto marginal del trabajo se torna muy pequeño (tiende a cero) a medida que aumenta el esfuerzo laboral (tiende a infinito) (Cervantes Jiménez, 2014, p. 339).

Otra forma de expresarlo es la siguiente (Cervantes Jiménez, 2014, p. 339):

$$zf(0) = 0 \quad \dots \quad (3)$$

$$zf'(N_t) > 0 \quad \dots \quad (4)$$

$$zf''(N_t) < 0 \quad \dots \quad (5)$$

La condición 3 establece que cuando el esfuerzo laboral es nulo el producto total será cero. La condición 4 dicta que la función siempre será creciente, es decir, que carece de segmentos decrecientes por lo que el producto marginal del trabajo siempre será positivo. La condición 5 determina que el producto marginal del trabajo es decreciente, sin llegar a ser nulo para cualquier volumen de producción. La condición del producto marginal decreciente del empleo se muestra en la ilustración 5 (Cervantes Jiménez, 2014, p. 339).

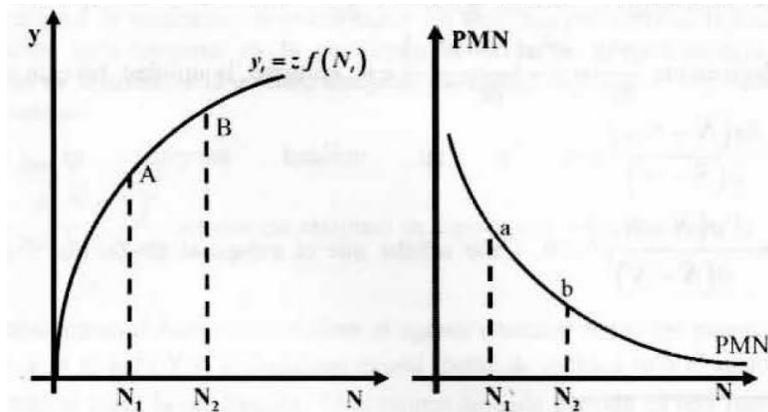


Ilustración 5. Funciones de producción y del producto marginal del empleo.
FUENTE: Cervantes Jiménez (2014, p. 339).

La ilustración 6 muestra que un choque tecnológico puede elevar o reducir la productividad marginal del trabajo, por lo que un aumento de $\eta_{\mathcal{P},n}^*$ desplazará la función de producción hacia arriba, incrementando el nivel de producto para un determinado nivel de esfuerzo laboral. En contraste, ante una reducción de $\eta_{\mathcal{P},n}^*$, la función de producción se desplaza hacia abajo, provocando una disminución del producto marginal del empleo para el mismo nivel de esfuerzo laboral (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 339-340).

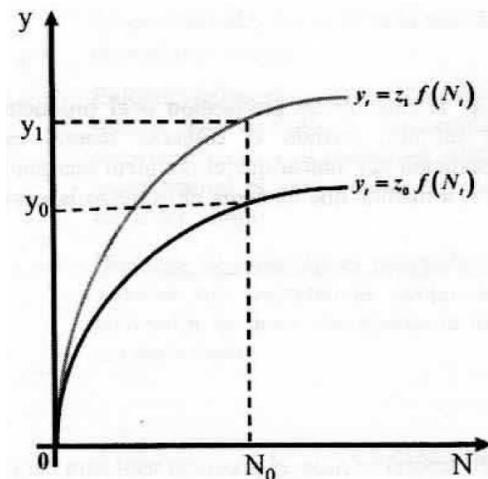


Ilustración 6. Choque tecnológico en la función de producción.
Fuente: Cervantes Jiménez (2014, p. 340).

VI.3. El sistema de preferencia ocio-consumo.

El agente tiene una cantidad fija de tiempo en cada periodo \bar{N} , por ejemplo de 24 horas, que puede distribuir entre trabajo N y ocio $o = \bar{N} - N$; además, debe de consumir el bien de consumo medio en unidades físicas c (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 340-342). En este tenor, la función de utilidad del agente es una disyuntiva entre cantidad de ocio y consumo. La ilustración 7 muestra todas las combinaciones posibles de consumo y esfuerzo laboral para un nivel de utilidad dado. La función de utilidad es la siguiente (Cervantes Jiménez, 2014, p. 340):

$$u = u(\bar{N} - N, c)$$

La utilidad del consumo es creciente (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 340-341):

$$\frac{\partial u}{\partial c} = \frac{\partial u(\bar{N} - N, c)}{\partial c} > 0$$

pero la utilidad marginal del consumo es decreciente:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial c^2} = \frac{\partial^2 u(\bar{N} - N, c)}{\partial c^2} < 0$$

Por otro lado, la utilidad del ocio es creciente:

$$\frac{\partial u}{\partial(\bar{N} - N)} = \frac{\partial u(\bar{N} - N, c)}{\partial(\bar{N} - N)} > 0$$

y su utilidad marginal es decreciente:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial(\bar{N} - N)^2} = \frac{\partial^2 u(\bar{N} - N, c)}{\partial(\bar{N} - N)^2} < 0$$

Cabe señalar que la utilidad del trabajo, al ser un mal, es decreciente:

$$\frac{\partial u}{\partial N} = \frac{\partial u(\bar{N} - N, c)}{\partial(\bar{N} - N)} \frac{\partial(\bar{N} - N)}{\partial N} < 0$$

y su utilidad marginal es creciente (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 340-341):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial N^2} = \frac{\partial^2 u(\bar{N} - N, c)}{\partial N^2} > 0$$

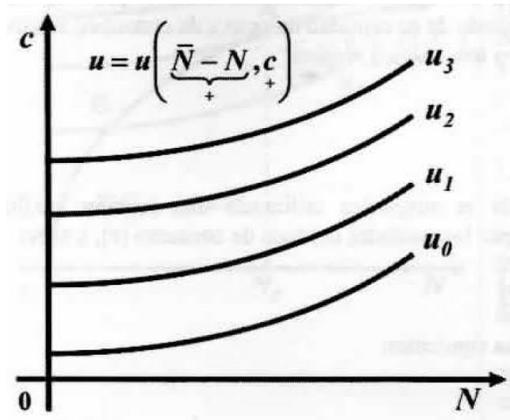


Ilustración 7. Curvas de indiferencia.
FUENTE: Cervantes Jiménez (2012, p. 341).

El nivel de utilidad es constante a lo largo de una curva de indiferencia. La pendiente en cualquier punto indica el incremento del consumo necesario para compensar el aumento de una unidad de trabajo (equivalente a la pérdida de una unidad de ocio). Se le denomina relación marginal de sustitución ocio-consumo RMS_{oc} (Cervantes Jiménez, 2014, p. 341):

$$RMS_{oc} = \frac{\frac{\partial u(\bar{N} - N, c)}{\partial (\bar{N} - N)}}{\frac{\partial u(\bar{N} - N, c)}{\partial c}}$$

Por otra parte, como el bien es perecedero, el agente consume todos los bienes que producen, por lo que:

$$c_t = Y_t = f(N_t)$$

El consumo es una fuente de utilidad para el agente y sólo podrá consumir más si eleva la producción. El consumo de cada periodo es una fuente de utilidad. La ecuación implica que una persona sólo puede consumir más si eleva su producción. Por otra parte, dada la tecnología, la cantidad producida de bienes depende del nivel de esfuerzo laboral. Por lo tanto, la cantidad de trabajo es la decisión clave que en este modelo toma el agente (Cervantes Jiménez, 2014, p. 341).

VI.4. La elección ocio-consumo.

El problema del agente es identificar la cantidad de ocio, trabajo y consumo consistente con la dotación inicial de tiempo disponible, así como el estado del arte de la tecnología que maximice la utilidad del agente (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 342-344). Matemáticamente, el problema del agente es maximizar su utilidad, la que depende de su cantidad de ocio y consumo, sujeto a la disponibilidad de tiempo y a la restricción tecnológica, a saber (Cervantes Jiménez, 2014, p. 342):

$$\begin{aligned} \max_{N_t, c_t} u(o_t, c_t) &= \max_{N_t, c_t} u(\bar{N} - N_t, c_t) \\ \text{s. a. } y_t &= f(N_t) \end{aligned}$$

En el equilibrio general de un productor y un consumidor es:

$$f'(N_t) = \frac{UM_{o_t}}{UM_{c_t}} \Rightarrow PMN = RMS_{oC}$$

La productividad marginal del trabajo debe de ser igual a la relación marginal de sustitución ocio-consumo. Este resultado significa que el agente económico elige la combinación de cantidad de trabajo y del bien de consumo que maximiza su utilidad; por tanto, elige la combinación (N_0, c_0) que es aquel punto donde la función de producción es tangente a la curva de indiferencia, tal como lo presenta el punto A de la ilustración 8 (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 342-343).

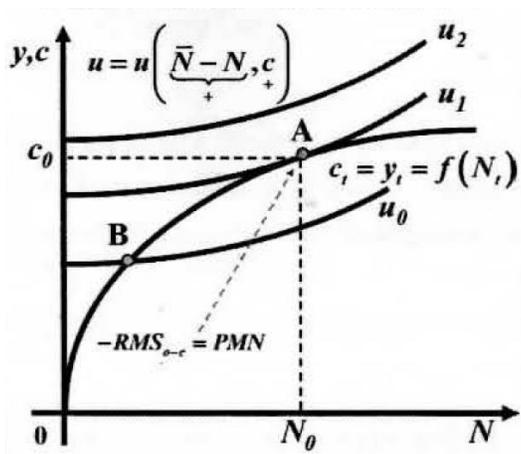


Ilustración 8. La elección ocio-consumo.
FUENTE: Cervantes Jiménez (2012, p. 343).

Este equilibrio es eficiente en el sentido de Pareto en dos sentidos (Cervantes Jiménez, 2014, p. 343):

- A. La demanda de trabajo es técnicamente óptima para la producción del bien de consumo porque el equilibrio está en la frontera de posibilidades de producción.
- B. La combinación de unidades del bien de consumo y las horas de trabajo le permite al agente alcanzar la máxima utilidad.

Ante una expansión exergética, se generarían dos efectos: el efecto riqueza y el efecto sustitución, que se reforzarían mutuamente respecto al consumo, pero se opondrían con respecto al trabajo y al ocio, por lo que su resultado final sería ambiguo: el esfuerzo laboral se reduciría cuando el efecto sustitución fuera menor que el efecto riqueza y el trabajo aumentaría cuando el efecto sustitución fuera mayor.

VI.6. La elección del consumo intertemporal.

La recta presupuestaria intertemporal parte de las siguientes definiciones (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 346-347):

- a) El productor se especializa en la producción del bien perecedero Y ; lo vende totalmente y el ingreso respectivo PY le permite solventar su consumo Pc .
- b) El precio P del bien es el número de unidades que recibe el vendedor y las que entrega al comprador. Como P compra una unidad del bien, con una unidad monetaria se compran $1/P$ unidades del bien; así que m/P es el dinero real expresado en unidades del bien. Se supone que el precio es constante.
- c) Como el bien no se puede almacenar, se incorpora la posibilidad de pedir y conceder préstamos en el mercado de crédito a un tipo de interés R . Se llama bono b al documento generalizado que recibe una persona a cambio

de conceder un préstamo a un tipo de interés. El bono carece de riesgo y todos los bonos son idénticos. Los bonos entre los prestamistas y los prestatarios son idénticos en magnitud, pero con signo contrario, por lo que la suma de bonos de todos los individuos es nula: $\Sigma b = 0$. Una unidad monetaria prestada es una unidad en deuda, al igual que la suma de los intereses pagados y los recibidos ($b + Rb = principal + intereses$). La cantidad mantenida de bonos en el periodo $t - 1$ (b_{t-1}) determinan los intereses pagados o percibidos en el periodo t (Rb_{t-1}).

La elección del consumo en dos periodos se relaciona con las opciones que ofrece un mercado de crédito al agente. Para estudiar las elecciones entre consumo en el periodo t (c_t) y el consumo en el periodo $t + 1$ (c_{t+1}), es útil expresar la restricción presupuestaria intertemporal en términos reales de la siguiente manera (Cervantes Jiménez, 2014, p. 349):

$$c_t + \frac{c_{t+1}}{1 + R} = Y_t + \frac{Y_{t+1}}{1 + R} + b_{t-1} \frac{(1 + R)}{P} - \frac{b_{t+1}}{P(1 + R)}$$

El consumo en los periodos t y $t + 1$ proceden del ingreso de ambos periodos y del ahorro en bonos. Para facilitar la exposición, se supone que se mantiene fija la suma del segundo miembro y se sustituye por x :

$$x = Y_t + \frac{Y_{t+1}}{1 + R} + b_{t-1} \frac{(1 + R)}{P} - \frac{b_{t+1}}{P(1 + R)}$$

Con lo que la ecuación se expresa como:

$$c_t + \frac{c_{t+1}}{1 + R} = x$$

Esta forma muestra que, dado un ingreso x , una economía doméstica puede alterar el consumo actual c_t ajustando debidamente el consumo futuro c_{t+1} . Su expresión lineal es la siguiente:

$$c_{t+1} = x(1 + R) - (1 + R)c_t$$

Esta recta presupuestaria intertemporal muestra todas las combinaciones de consumos presente y futuro que satisfacen la restricción presupuestaria de la

economía doméstica. La pendiente de la línea presupuestaria es $-(1 + R)$, en donde la tasa de interés R es la prima en consumo futuro que se obtiene por posponer el consumo presente, de tal forma que la disminución del consumo presente se ve compensada por $1 + R$ veces en consumo futuro (Cervantes Jiménez, 2014, p. 349).

Para identificar la elección de consumo intertemporal, a la restricción presupuestaria intertemporal se le agrega el sistema de preferencia intertemporal, en donde las curvas de indiferencia se construyen con respecto a las diferentes combinaciones de consumo presente y futuro.

El problema de elección de consumo intertemporal es maximizar la utilidad que le reporta al agente el consumo presente y futuro restringido por su presupuesto. Matemáticamente, el problema de optimización es (Cervantes Jiménez, 2014, p. 350):

$$\begin{aligned} & \max_{c_t, c_{t+1}} u(c_t, c_{t+1}) \\ & s. a. \quad x(1 + R) - c_t(1 + R) - c_{t+1} = 0 \end{aligned}$$

La relación marginal de sustitución de consumo presente por consumo futuro sería igual a uno más la tasa de interés (costo de oportunidad por posponer el consumo presente):

$$RMS_{c_t c_{t+1}} = \frac{UM_{c_t}}{UM_{c_{t+1}}} = 1 + R$$

En el equilibrio intertemporal, la pendiente de la curva de indiferencia intertemporal es tangente a la restricción presupuestaria intertemporal, que mide el consumo necesario en el periodo $t + 1$ para compensar la pérdida de consumo de una unidad en el periodo t , la que debe de ser igual a la relación marginal de sustitución de consumo presente por consumo futuro. En el equilibrio, la prima por ahorrar compensa exactamente la disposición a diferir del consumo. El equilibrio intertemporal se muestra en la ilustración 9 (Cervantes Jiménez, 2014, p. 350).

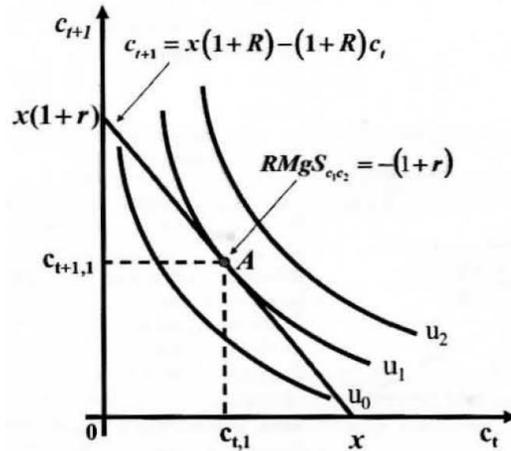


Ilustración 9. La elección de consumo intertemporal.
 Fuente: Cervantes Jiménez (2017, p. 351).

Para medir los efectos sustitución e ingreso, se tendría que generar una restricción presupuestaria intertemporal compensada. Sin embargo, por lo general, con una disminución de la tasa de interés, se renuncia a cierta cantidad de consumo futuro por presente (Cervantes Jiménez, 2014, p. 351).

VI.7. El mercado de trabajo.

Se supone que el trabajo de todos los agentes es físicamente igual y que el mercado de trabajo es competitivo y el que determina el salario por persona y hora \mathcal{W} (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 354-357). Cuando un agente ofrece N^s horas de trabajo durante un determinado periodo, recibe un ingreso laboral de $\mathcal{W}N^s$. Si N^d es el número de horas de trabajo que demanda una empresa en el mercado, esta paga a sus trabajadores la cantidad $\mathcal{W}N^d$ en concepto de salarios (Cervantes Jiménez, 2014, p. 354).

La empresa utiliza los servicios de trabajo para producir bienes: $Y = f(N^d)$ y su beneficio es $PY - \mathcal{W}N^d = Pf(N^d) - \mathcal{W}N^d$. El beneficio de empresa se distribuye entre las economías domésticas que son sus propietarias. Así que el ingreso total de cada economía doméstica comprende la participación en los beneficios generados por las empresas, el ingreso salarial y los ingresos por intereses (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 354-355).

La última unidad de trabajo contribuye a la producción de lo justo como para cubrir el costo adicional de esta unidad de trabajo expresada en unidades de bienes (el salario real). Matemáticamente (Cervantes Jiménez, 2014, p. 355):

$$\pi = Pf(N^d) - \mathcal{W}N^d \Rightarrow \frac{d\pi}{dN^d} = Pf'(N^d) - \mathcal{W} = 0$$

$$Pf'(N^d) = \mathcal{W} \Rightarrow f'(N^d) = \frac{\mathcal{W}}{P} = w$$

Cuando la curva de productividad marginal del trabajo se desplaza hacia arriba cualquiera que sea el salario real, el empleo aumenta hasta que la productividad marginal vuelve a igualarse con el salario real. Así, la demanda agregada de trabajo depende del salario real (Cervantes Jiménez, 2014, p. 355):

$$N^d = N^d \left(\begin{array}{c} \mathcal{W}/P, \dots \\ - \end{array} \right) = N^d \left(\begin{array}{c} w, \dots \\ - \end{array} \right)$$

Los resultados en este mercado pueden resumirse mediante las siguientes funciones de oferta de trabajo y demanda de consumo agregadas (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 355-356):

$$N^s = N^s \left(\begin{array}{c} w, R, \dots \\ + + \end{array} \right)$$

$$c^d = c^d \left(\begin{array}{c} w, R \\ + - \end{array} \right)$$

El mercado de trabajo se vacía cuando la oferta agregada de trabajo es igual a su demanda agregada:

$$N^d \left(\begin{array}{c} w, \dots \\ - \end{array} \right) = N^s \left(\begin{array}{c} w, R, \dots \\ + + \end{array} \right)$$

La ilustración 10 muestra que la demanda y la oferta de trabajo agregadas son iguales al salario real w_0 y el nivel de trabajo agregado que vacía el mercado es N_0 (Cervantes Jiménez, 2014, p. 356).

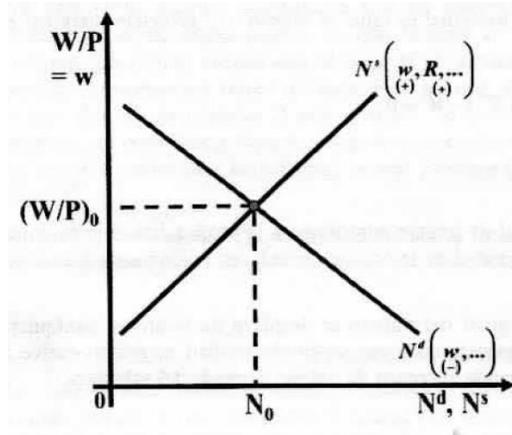


Ilustración 90. Vaciado del mercado laboral.
Fuente: Cervantes Jiménez (2012: 357).

VI.8. El mercado monetario.

Se supone que el dinero es el único medio de cambio en la economía (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 357-360). Se realizan intercambios entre dinero y bonos, pero no directamente entre bonos y bienes producidos por las diferentes economías domésticas (Cervantes Jiménez, 2014, p. 357).

Los saldos monetarios reales de un agente M/P , la cantidad media real de dinero demanda por un individuo, depende inversamente de la tasa de interés R , directamente del volumen de gasto C y directamente del costo real de transacción γ/P (Cervantes Jiménez, 2014, p. 357):

$$\frac{M}{P} = f\left(R, \frac{C}{P}, \frac{\gamma}{P}\right)$$

- + +

Para hallar el saldo monetario medio en términos nominales, se multiplica la ecuación anterior por el nivel de precios (Cervantes Jiménez, 2014, p. 357):

$$M = Pf\left(R, \frac{C}{P}, \frac{\gamma}{P}\right)$$

- + +

Esta ecuación permite deducir que los saldos monetarios medios nominales dependen directamente del nivel de precios. Los saldos monetarios reales agregados se parecen a la cantidad media de dinero de un individuo, pero

multiplicada por el número de economías domésticas (Cervantes Jiménez, 2014, p. 357).

La cantidad real agregada demanda de dinero real y nominal se expresan mediante las siguientes funciones, respectivamente (Cervantes Jiménez, 2014, p. 357):

$$\frac{\mathbb{M}}{P} = f\left(R, \frac{c}{P}, \frac{Y}{P}\right)$$

$$\mathbb{M} = Pf\left(R, \frac{c}{P}, \frac{Y}{P}\right)$$

Como el gasto se relaciona directamente con el ingreso, la demanda de dinero, que se mantiene voluntariamente, depende positivamente del nivel general de precios, inversamente de la tasa de interés y directamente del ingreso, en términos nominales y reales. Respectivamente, se representa por (Cervantes Jiménez, 2014, p. 358):

$$\mathbb{M}^D = P \left[f\left(R, Y, \dots\right) \right]$$

$$\frac{\mathbb{M}^D}{P} = f\left(R, Y, \dots\right)$$

Los puntos suspensivos representan los efectos producidos distintos sobre la demanda real de dinero a la tasa de interés y el nivel de producción. Por su parte, el *stock* de dinero es una decisión de los gestores de política económica (Cervantes Jiménez, 2014, p. 358).

La ilustración 11 muestra la igualdad entre el *stock* de dinero (que es constante porque no depende de los precios) y la demanda de dinero, la que, dados los valores de la tasa de interés y el ingreso, es una línea recta que parte del origen. El vaciado del mercado de dinero se alcanza al nivel general de precios P_0 (Cervantes Jiménez, 2014, p. 358).

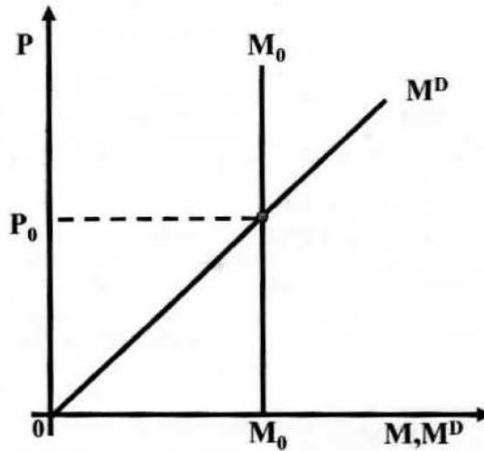


Ilustración 11. El mercado de dinero.
Fuente: Cervantes Jiménez (2012, p. 359).

A partir del equilibrio mostrado en la ilustración 10, cuando se incrementa la oferta de dinero, suben los precios. Si la economía presenta neutralidad del dinero, entonces el aumento proporcional de los precios es idéntico a la tasa de inflación. Sin embargo, si los precios no fluctúan de manera inmediata, entonces el alza de los precios se rezaga, como se observa en la ilustración 12 (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 359-360).

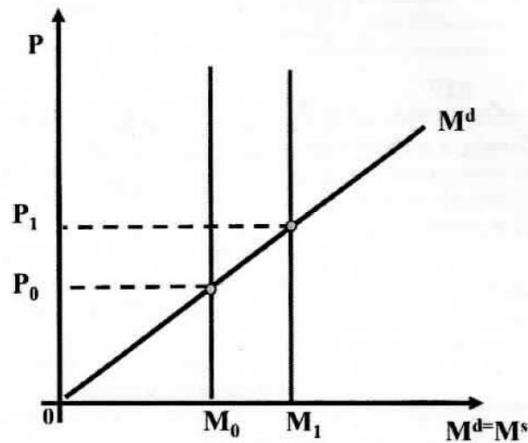


Ilustración 12. Neutralidad del dinero.
Fuente: Cervantes Jiménez (2012: 360).

VI.9. El vaciado del mercado de bienes.

La condición de vaciado de mercado de bienes en el periodo actual se expresa como (Cervantes Jiménez, 2014, p. 361):

$$Y^s \left(\begin{matrix} R, \dots \\ + \end{matrix} \right) = c^d \left(\begin{matrix} R, \dots \\ - \end{matrix} \right)$$

Las variables omitidas, indicadas por medio de puntos suspensivos, son los efectos riqueza y sustitución provocados por los cambios de la función de producción. Algunos cambios benefician a unos agentes y perjudican a otros. Éstos se conocen como efectos distributivos pero como no se tiene idea exacta de su influencia se prescinde de ellos en el análisis agregado (Cervantes Jiménez, 2014, p. 361).

Un aumento de la tasa de interés R reduce la demanda actual de consumo c^d y la función consumo es decreciente; en tanto que eleva el esfuerzo laboral y la oferta actual de bienes Y^s , por lo que la función de oferta es decreciente. La ilustración 13 muestra que la tasa de interés R_0 es la única tasa que permite el vaciado del mercado de bienes. Conocido el nivel de producción que vacía el mercado de bienes, se puede usar la función de producción agregada para calcular el nivel de trabajo agregado correspondiente a la condición de vaciado de mercado (Cervantes Jiménez, 2014, pp. 361-362).

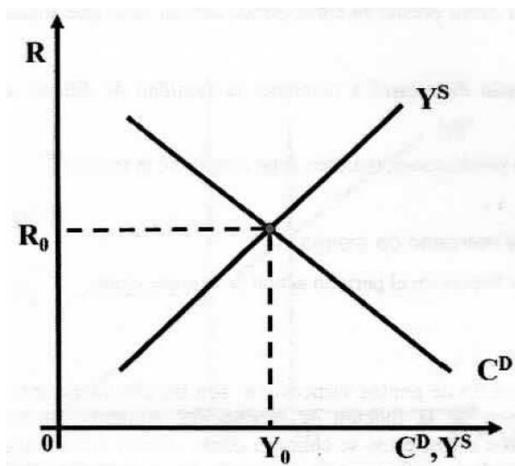


Ilustración 13. Vaciado del mercado de bienes.
FUENTE: Cervantes Jiménez (2012, p. 362).

VI.10. Choques transitorios por expansión exergética.

Ésta y la siguiente sección se extienden de los supuestos del ciclo económico real tomado de (Cervantes Jiménez, 2014) Se ha visto en secciones anteriores que un desplazamiento positivo de la función de producción puede ser causado por un aumento de la eficiencia termodinámica real del sistema energético y productivo de la economía $\eta_{P,n}^*$ para un nivel de esfuerzo laboral dado (véase ilustración 14).

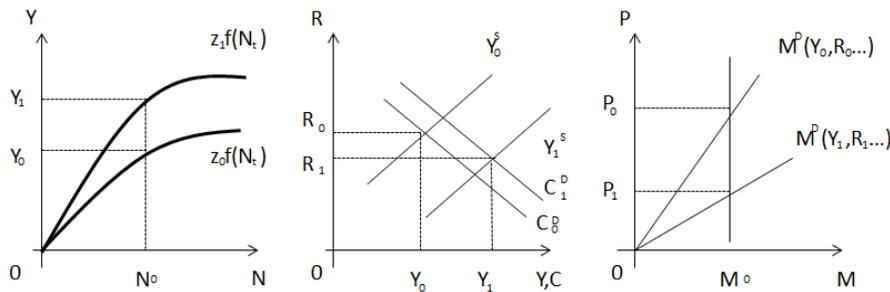


Ilustración 104. Efectos de un choque transitorio positivo en los mercados de bienes y dinero.
Fuente: Elaboración propia.

Este choque positivo transitorio aumenta la oferta de bienes de Y_0^S a Y_1^S . Por su parte, la curva de demanda de bienes también se desplaza hacia la derecha desde c_0^d a c_1^d . Al ser transitorio el choque, el desplazamiento de la curva de oferta es mayor que el de la curva de demanda, lo que genera un exceso de oferta de bienes a la tasa de interés inicial R_0 , lo que significa que los agentes pueden reducir sus deudas o aumentar su ahorro actual.

No todos podrán aumentar su ahorro o disminuir sus deudas, ya que el ahorro agregado es nulo, por lo que la tasa de interés debe ajustarse para que el ahorro total deseado sea acorde con el nuevo panorama de la economía. La disminución de la tasa de interés aumenta la cantidad demandada de bienes a lo largo de la curva c_1^d y reduce la cantidad ofrecida a lo largo de la curva Y_1^S . Al nuevo tipo de interés R_1 , el mercado de bienes se vacía con un incremento de la producción.

El crecimiento de la producción y la baja de la tasa de interés disminuyen la pendiente de la curva de demanda de dinero de M_0^d a M_1^d y el nivel de precios

queda reducido de P_0 a P_1 . La baja de precios queda establecida por la igualdad entre la cantidad demandada de dinero y la cantidad dada de dinero. En suma, el choque positivo de oferta provoca un aumento de la producción, un crecimiento del consumo, reduce la tasa de interés, aumenta la demanda real de dinero y, dada la cantidad de dinero, disminuye el nivel general de precios.

Los efectos de la expansión exergética sobre el nivel y el mercado de trabajo son ambiguos. El nivel laboral N que vacía los mercados de esta economía subirá o bajará, y la curva de demanda de trabajo N^d se desplazará hacia la derecha o la izquierda, según la magnitud de los efectos sustitución y riqueza. El nivel de empleo aumentará o disminuirá, dependiendo de cuál de los dos efectos, el sustitución o el riqueza, sea el que domine en la elección ocio-consumo. De manera similar, los efectos de una disminución de la tasa de interés causada por un choque tecnológico positivo sobre el mercado de crédito dependerán del sistema agregado de preferencia intertemporal de la economía. Por lo general, con una disminución de la tasa de interés, se renuncia a cierta cantidad de consumo futuro por presente.

VI.11. Choques permanentes por expansión exergética.

En todos los casos de choques positivos permanente, se produce un fuerte efecto positivo sobre la demanda de bienes, por lo que la oferta de bienes aumenta más que en un desplazamiento transitorio. Dada la tasa de interés, el aumento de los bienes ofrecidos y demandados es aproximadamente el mismo –ilustración 15-.

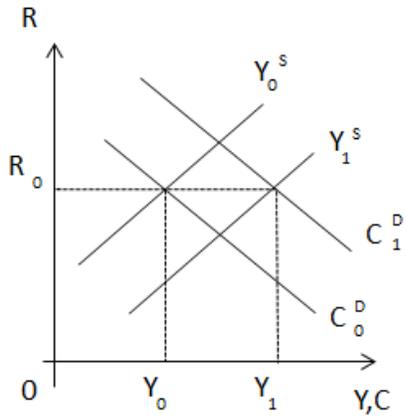


Ilustración 115. Efectos de un choque permanente positivo en los mercados de bienes y dinero.
Fuente: Elaboración propia.

Cuando el choque es permanente, la producción y el consumo aumentan simétricamente, permaneciendo constante la tasa de interés. El aumento de demanda de consumo refleja el crecimiento de riqueza. Como la producción aumenta y la tasa de interés no varía, la cantidad real de dinero demanda aumenta y baja el nivel general de precios.

Conclusiones

Ésta ha sido una investigación documental que ha mostrado argumentos a favor del análisis de los procesos productivos según los criterios de la primera y segunda ley de la termodinámica a la hora de describir sistemas sujetos a las condiciones de los ambientes físicos y económicos del que se rodean. Dado que la energía es el factor productivo que propiamente da origen a los cambios que en aquél se generan, para los fines buscados, el estudio detallado de sus propiedades es necesario, a saber: la energía se conserva y disipa.

Posteriormente, comenzaba a hablarse de la importancia del concepto de irreversibilidad en dichos procesos, no solamente de la provocada por la fricción, la expansión libre de los gases, el mezclado de dos fluidos, entre otras causas internas de los sistemas de conversión de energía; sino también de la que deriva de aquellos flujos de materia y energía que salen de la unidad y la planta productiva y no son subsecuentemente utilizados. El ejemplo de la simbiosis industrial de Kalundborg, Dinamarca, ilustra que evitar este segundo tipo lleva una eficiencia productiva mayor.

Se definió la eficiencia termodinámica real del sistema productivo de toda una economía como el producto de las eficiencias de las unidades que forman parte de ella, lo que es congruente porque la eficiencia termodinámica de las industrias de bienes de consumo y servicio finales, que son las que se contabilizan en el PIB real, básicamente es función de las eficiencias que añaden valor a la producción desde que es tratada como materia prima. Se adaptó dicha característica del conjunto energético de la economía a la función convencional de producción. El tratamiento analítico de la expansión exergética es más sencillo en esta versión, porque se trata como cualquier choque tecnológico positivo.

Según el modelo del ciclo económico real, una expansión exergética implica un desplazamiento positivo de la función de oferta en el mercado de bienes, lo que incrementa el producto neto y disminuye la tasa de interés. La demanda se ajusta dependiendo de si este choque es transitorio o permanente. La expansión contrae

la demanda de saldos en el mercado monetario, lo que hace disminuir el nivel de precios si es que la oferta monetaria está dada.

Los resultados en los mercados de trabajo y crédito son ambiguos, pues dependen de las formas de las curvas agregadas de preferencia ocio-consumo y consumo presente-consumo futuro, respectivamente. Por lo común, el consumo presente sube y el futuro baja con un choque tecnológico positivo; en tanto que, en el mercado de trabajo, la curva de demanda de trabajo se desplazará hacia la izquierda o a la derecha, dependiendo de la magnitud de los efectos sustitución y renta. La expansión exergética deriva en un incremento de la producción; sin embargo, harían falta más criterios para determinar qué pasaría en una economía en concreto con el nivel de esfuerzo laboral, el consumo intertemporal, etc.

La construcción de la ciencia y la práctica económica debería considerar teorías alternativas que expliquen o conmensuren el valor económico; en este trabajo de investigación se insistió con la teoría termoeconómica del coste exergético, en vista de que es la exergía la que es capaz de transformar las materias del medio ambiente en productos de provecho para la sociedad. Se puede concluir, además, que la ciencia termoeconómica puede ser útil para la contabilización del valor económico en los diversos sectores industriales.

Debido al hecho de que la producción del bienestar es un suceso que concierne a los miembros de una nación, se sugiere un incremento en el gasto en investigación y desarrollo en las áreas de productividad, energía, termoeconomía y metabolismo social, no sin olvidar una adecuada coordinación de las instituciones, empresas y sindicatos para el logro solidario del bien común.

Bibliografía

- Enciclopedia Autodidáctica Océano*. t. 4. 1990. Barcelona, España: Océano.
- Ayala Espino, J., 1996. *Economía pública: Una guía para entender al Estado*. México: Facultad de Economía-Universidad Nacional Autónoma de México.
- Boyer, R. & Freyssenet, M., 2001. *Los modelos productivos*. Buenos Aires, Argentina: Lumen.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A., 2012. *Termodinámica*. Séptima ed. México: McGraw Hill.
- Cervantes Jiménez, M., 2014. *Macroeconomía. Teoría, políticas, simuladores computacionales y retos*. México: Laboratorio de Análisis Económico y Social.
- Costa Sorolla, J., 2011. *Aplicación de la termoeconomía a la ecología industrial en Kalundborg*, tesis de maestría. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza.
- Dieterich, H., 1996. *Nueva guía para la investigación científica*. México: Ariel.
- Díez Díaz-Estébanez, M., 2013. Del carbón vegetal al coque en la industria del hierro y del acero. *Fundi*, I(45), pp. 48-56.
- DOF, 2013. *Programa para Democratizar la Productividad 2013-2018*. México [En línea] Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5312422&fecha=30/08/2013 [Último acceso: 28 julio 2017].
- Dussel Peters, E., 1997. *La economía de la polarización. Teoría y evolución del cambio estructural de las manufacturas mexicanas (1988-1996)*. México: Jus.
- Gobierno de la República, 2017. *Programa para Democratizar la Productividad 2013-2018. Logros 2016*, México: Secretaría de Hacienda y Crédito Público.
- ITDP, Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo, 2013. *Movilidad Urbana y Sustentable*. México. [En línea] Available at: [http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Movilidad-Urbana-Sustentable-MUS .pdf](http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Movilidad-Urbana-Sustentable-MUS.pdf) [Último acceso: 29 Septiembre 2017].
- Jaramillo Salgado, Ó. A., 2007. *Eficiencia de ciclos por segunda ley de la termodinámica*. México [En línea] Disponible en: <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Termodinamica/node88.html> [Último acceso: 3 Mayo 2017].
- Lozano, M. A. & Valero, A., 1993. Theory of the exergetic cost. *Energy*, 18(9), pp. 939-960.
- Mankiw, N. G., 2014. *Macroeconomía*. Octava ed. Barcelona, España: Antoni Bosch.
- Martínez Alier, J. & Schlüpmann, K., 1991. *La economía y la ecología*. México: Fondo de Cultura Económica.

- Moran, M. J. & Shapiro, H. N., 2004. *Fundamentos de termodinámica técnica*. Segunda ed. Barcelona, España: Reverté.
- OCDE, 2017. *OECD Compendium of Productivity Indicators 2017*, París, Francia: OECD Publishing.
- Pacheco Rojas, D. A., 2016. *Aplicación de la teoría del costo exergo-económico en el análisis del sistema energético nacional como una herramienta para el desarrollo sustentable*, tesis de maestría. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Palazzo, P., 2013. Thermoeconomics and exergy method in environmental engineering. *J Civil Environ Eng*, III(1), pp. 1-2.
- Pérez, C., 1992. Cambio técnico, restructuración competitiva y reforma institucional en los países en desarrollo. *El trimestre económico*, LIX(1), pp. 23-41.
- Pérez, C., 2004. *Revoluciones tecnológicas y capital financiero. La dinámica de las grandes burbujas financieras y las épocas de bonanza*. México: Siglo XXI.
- Rosen, M. A., 2008. *A concise review of exergy-based economic methods*. Cambridge, Universidad de Cambridge. Reino Unido.
- Sánchez, C., 2014. Automatización en la industria automotriz: conceptos y procesos. *Desarrollo tecnológico e innovación empresarial*, II(3), pp. 11-15.
- Sciubba, E., 2012. A thermodynamically correct treatment of externalities with an exergy-based numeraire. *Sustainability*, IV(1), pp. 933-957.
- Silva Larrotta, J. R., 2015. *La termoeconomía como alternativa para mejorar la competitividad industrial*, tesis de maestría. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Stiglitz, J. E., 2000. *La economía del sector público*. Tercera ed. Barcelona, España: Antoni Bosch.
- Torres González et al., 2017. Estudio exergoeconómico de factibilidad a una planta térmica de cogeneración, en *VI Simposio Internaiconal de Energía*. Puerto Rico
- UNAM, 2017. *Carreras por campo ocupacional*. México. [En línea]
 Disponible en:
http://www.dgoserver.unam.mx/feria_empleo/feriaXII/Sitio/htmls/carreras.html
 [Último acceso: 11 Mayo 2017].
- UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, 2009a. *Ahorro de energía en la industria del papel*. Colombia. [En línea]
 Available at: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/papel.pdf>
 [Último acceso: 30 Septiembre 2017].
- UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, 2009b. *Ahorro de energía en la industria del vidrio*. Colombia. [En línea]
 Available at: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Procesos/vidrio.pdf>
 [Último acceso: 30 Septiembre 2017].

Valero, A. & Torres Cuadra, C., 2009. Thermo-economic analysis. *Exergy, energy system analysis and optimization*, II(1), pp. 1-35.

Wall, G., 1991. On the optimization of refrigeration machinery. *International Journal of Refrigeration*, 14(1), pp. 336-340.

Wall, G., 1997. Energy, society and morals. *Journal of human values*, III(2), pp. 193-206.