

EXERGIA...LA DESCONOCIDA
AUTOR: EDGAR S. PEÑARANDA MUÑOZ¹
AUYDANTE: YSABEL A. SANTOS CORRALES

RESUMEN

ESTE TRABAJO ES UNA PROPUESTA Y ARGUMENTACIÓN DE LA IMPERIOSA NECESIDAD DE INSERTAR LA ENSEÑANZA DE LA "EXERGIA" DENTRO DE LOS CONTENIDOS BÁSICOS DE LA TERMODINÁMICA PARA ESTUDIANTES DEL NIVEL DE LICENCIATURA EN LAS RAMAS CORRESPONDIENTES DE LA INGENIERÍA. PARA ESTO SE PLANTEA QUE EL ESFUERZO TENDRÁ QUE ESTAR CENTRADO EN LA BÚSQUEDA CREATIVA DE RECURSOS DIDÁCTICOS QUE PERMITAN DESMADEJAR EXITOSAMENTE LA ENSEÑANZA DE LA SEGUNDA LEY Y LA ENTROPÍA; SÓLO EL ÉXITO DE ESTA EMPRESA PODRÁ GARANTIZAR LA APERTURA A NUEVAS DIMENSIONES DE LA TERMODINÁMICA: LA EXERGIA, ANERGIA, EFICIENCIA ENERGÉTICA, TERMOECONOMÍA, TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN, LA ECOLOGÍA, DEGRADACIÓN, IRREVERSIBILIDAD, ETC., CUYO POTENCIAL PUEDE INCLUSO ALLANAR LA DEBILIDAD ENDÉMICA DE LA FALTA DE LINEAS IDEOLÓGICAS EN LA FORMACIÓN UNIVERSITARIA.

DESARROLLO

QUE ES LA EXERGÍA?

UNA CORRECTA RESPUESTA NO GARANTIZA HONOR DEL CONOCIMIENTO Y PUEDE ACABAR SIENDO SÓLO UN ACOPIO CUIDADOSO DE LAS YA ABUNDANTES Y MARAVILLOSAS DEFINICIONES DE LA EXERGIA, QUE SÓLO PODRÁ SER DEVELADA VERÍDICA Y PLENAMENTE A PARTIR DE LA COMPRENSIÓN DE LAS SIEMPRE ELUDIDAS: SEGUNDA LEY Y LA ENTROPÍA.

LA SEGUNDA LEY ES MUCHO MÁS QUE EL RECURSO CONCEPTUAL SOBRE EL CUAL SE FUNDAMENTA LA NOCIÓN DEMASIADO VULGARIZADA DEL RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS, ES UNA HERRAMIENTA QUE VA MÁS ALLÁ Y PROFUNDIZA EL CONCEPTO DE LA CALIDAD DE LAS TRANSFORMACIONES ENERGÉTICAS, PERCEPCIÓN ALGO EXTRAVAGANTE AL PRIMEROCENTRISMO DE GENERACIONES Y GENERACIONES DE INGENIEROS FORMADOS EN LA TERMODINÁMICA "TÉCNICA" CLÁSICA, BASADA EN EL USO HEGEMÓNICO DE LA PRIMERA LEY.

LA CONCEPTUALIZACIÓN ACTIVA DE LA SEGUNDA LEY Y LA ENTROPÍA TIENE QUE ACABAR DIGIRIENDO ENTERAMENTE LOS ENUNCIADOS DE KELVIN-PLANK, CLAUSIUS, LA DESIGUALDAD DE CLAUSIUS Y LA DEFINICIÓN DE LA ENTROPÍA:

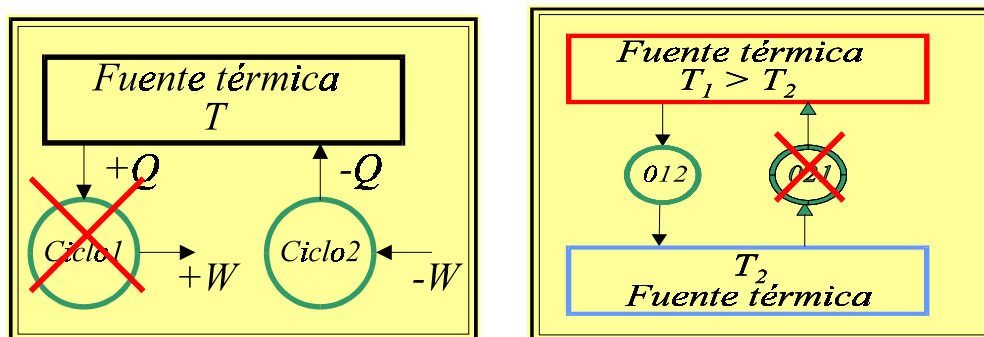


FIG.1. ENUNCIADOS GRÁFICOS DE KELVIN-PLANK Y CLAUSIUS
LA DESIGUALDAD DE CLAUSIUS EXPLÍCITA DE FORMA CUANTIFICABLE LA NATURALEZA REVERSIBLE O IRREVERSIBLE DE LOS PROCESOS:

¹ COORDINADOR DE LA SOCIEDAD DE INVESTIGACION EN INGENIERIA ENERGETICA (SIIE) Y DOCENTE DE INGENIERIA MECANICA-ELECTROMECHANICA DE LA FACULTAD NACIONAL DE INGENIERIA, ORURO-BOLIVIA

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq_{rev}^{irrev} 0 \quad (1)$$

EN CUANTO A LA DEFINICIÓN DE LA ENTROPÍA, PROBABLEMENTE EL CONCEPTO QUE PUEDE TENER MÁS RECURSOS DIDÁCTICOS ES EL DE LA ENTROPÍA COMO UNA MEDIDA DEL DESORDEN: EL CRECIMIENTO DE LA ENTROPÍA SIGNIFICA EL INCREMENTO DEL DESORDEN. A PARTIR DE ESTA BURDA DEFINICIÓN SE PUEDE ENCARAR LA COMPRESIÓN DE LOS CONCEPTOS DE: MEDIDA DE LA DISPONIBILIDAD Y MEDIDA DE LA DIRECCIÓN DE LOS PROCESOS NATURALES; PARA FINALMENTE RATIFICAR QUE LA ENTROPÍA AL SER UN PARÁMETRO INDEPENDIENTE DE LA TRAYECTORIA DE LOS PROCESOS ES DEFINITIVAMENTE UNA PROPIEDAD DE LAS SUBSTANCIAS:

$$S_2 - S_1 \geq_{rev}^{irrev} \int_1^2 \left(\frac{dQ}{T} \right) \quad (2)$$

A TRAVÉS DE LA EXPRESIÓN (2) SE PUEDE COMPRENDER QUE LA ENTROPÍA PUEDE USARSE PARA INDICAR EL GRADO DE IRREVERSIBILIDAD DE UN PROCESO TERMODINÁMICO, POR LO TANTO SU USO AYUDA A PREDECIR, CUANTITATIVAMENTE LA MEJOR SALIDA POSIBLE PARA UN SISTEMA DADO, ESTO SIGNIFICA QUE LA ENTROPÍA ES UNA MEDIDA DE LA ENERGÍA NO DISPONIBLE O SEA QUE CADA VEZ QUE SE GENERA, PRODUCE O CREA ENTROPÍA SE ESTA CREANDO ENERGÍA NO DISPONIBLE.

LA SEGUNDA LEY A TRAVÉS DE LA ENTROPÍA DEJA EXPLÍCITA Y SUSTENTADA LA INEXORABLE TENDENCIA AL CAOS A LA MUERTE TÉRMICA DEL UNIVERSO Y NADA MÁS CABAL CUANDO HACE UNOS CUARENTA AÑOS UN MAGNÍFICO NEÓFITO, MARIO CORTAZAR, EN ALGUNA PARTE DE SU INTRINCADA RAYUELA SE REFIRIÓ A LA ENTROPÍA COMO “LA MISTERIOSA TENDENCIA A LA NEUTRALIZACIÓN”.

LA TERMODINÁMICA CLÁSICA BASADA EN EL PRIMERA LEY NOS PONE EN RIESGO DE INDUCIRNOS ACTITUDES SIN COMPROMISO BASADAS EN SU NATURALEZA MISMA: LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA, NADA SE CREA NI SE DESTRUYE SOLO HAY TRANSFORMACIONES; LA INSERCIÓN DEL SEGUNDO PRINCIPIO PROPICIA EL DESARROLLO DE CRITERIOS MÁS COHERENTES CON NUESTRO ENTORNO Y CREA UNA APARENTE CONTRAPOSICIÓN A LA PRIMERA LEY QUE PERMITE UNA COMPRESIÓN MÁS EQUILIBRADA DE LA TERMODINÁMICA.

LA NATURALEZA DE LA INTERACCIÓN DE LA PRIMERA Y SEGUNDA LEY DEJA LA SENSACIÓN DE LA CONTRAPOSICIÓN COMO UN MECANISMO NATURAL, ASÍ MIENTRAS QUE LA ECUACIÓN PARA LA PRIMERA LEY ES EXPRESADA EN TÉRMINOS DE UNA IGUALDAD; LA SEGUNDA LEY ESTÁ DADA EN TÉRMINOS DE UNA IGUALDAD-DESIGUALDAD²; MIENTRAS QUE LA PRIMERA LEY HABLA QUE LA ENERGÍA NO SE CREA NI DESTRUYE, LA SEGUNDA LEY NOS DICE QUE LA ENTROPÍA NO SE DESTRUYE SOLO SE CREA³.

ESTA PLATAFORMA CONCEPTUAL REFERIDA A LA SEGUNDA LEY PERMITE AHORA ENTRAR DE LLENO EN LA DEFINICIÓN DE LA EXERGÍA; EXISTEN DOS PROCEDIMIENTOS PARA CUANTIFICAR LA NATURALEZA IRREVERSIBLE DE LOS PROCESOS REALES, AMBOS SON UNA APLICACIÓN SIMULTÁNEA DE LA PRIMERA Y SEGUNDA LEY DENOMINADOS ANÁLISIS DE LA SEGUNDA LEY. UN PROCEDIMIENTO UTILIZA LOS CONCEPTOS DE LA GENERACIÓN DE LA ENTROPÍA Y TRABAJO PERDIDO Y EL OTRO EMPLEA LOS CONCEPTOS DE DISPONIBILIDAD (EXERGÍA) Y DE IRREVERSIBILIDAD (PERDIDA DE DISPONIBILIDAD O DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA).

² WILLIAM L. HABERMAN, JAMES E.A. JOHN, TERMODINÁMICA PARA INGENIERÍA CON TRANSFERENCIA DE CALOR, EDIT. TRILLAS, CAP. SIETE, PAG. 176, MEXICO, 1996

³ MENDIZABAL LUIZAGA EDMUNDO, TERMODINAMICA TECNICA (MEC 244), ED. CALAMA, CAP. 11, PAG.114, LA PAZ-BOLIVIA, 1992

LA ENERGÍA ESTA DISPONIBLE EN VARIAS DIFERENTES FORMAS Y PUEDE SER TRANSFORMADA ENTRE CUALQUIERA DE ESTAS FORMAS. DIFERENTES ENERGÍAS TIENE DIFERENTES CALIDADES Y ESTE ATRIBUTO ESTÁ DEFINIDO POR LA CANTIDAD TEÓRICA DE ENERGÍA QUE PUEDE SER CONVERTIDA EN TRABAJO MECÁNICO (W), ESTA CONVERSIÓN TIENE SUS LIMITACIONES QUE IMPLICA QUE LA CALIDAD TOTAL DE LA ENERGÍA DECRECE EN CADA CONVERSIÓN⁴. NO HAY QUE OLVIDAR QUE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ESTA DESCRITA EN EL CONCEPTO DE LA ENTROPÍA:

ALTA ENTROPÍA $\longrightarrow$ BAJA CALIDAD DE ENERGÍA⁴

EXERGIA PARA SISTEMAS CERRADOS O NO FLUENTES

SI UNO DE ELLOS ES UN SISTEMA IDEAL (MEDIO AMBIENTE) Y EL OTRO ES UN *SISTEMA CERRADO NO FLUENTE*, LA EXERGÍA ES EL TRABAJO TEÓRICO MÁXIMO QUE SE PUEDE OBTENER DE SU MUTUA INTERACCIÓN HASTA ALCANZAR EL ESTADO DE EQUILIBRIO, DEPENDIENDO EL VALOR NUMÉRICO DE LA MISMA DE LOS ESTADOS DEL SISTEMA CERRADO CONSIDERADO Y DEL MEDIO AMBIENTE (FIG.2).

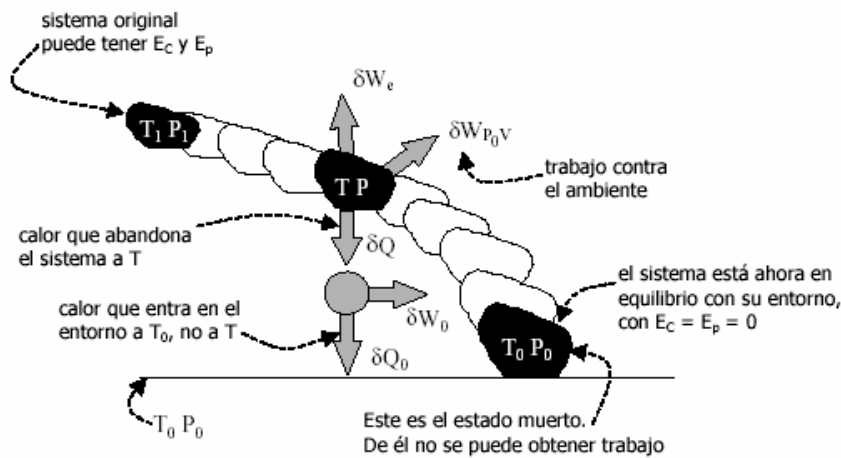


FIG. 2. ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE LA EXERGÍA DE UN SISTEMA NOFLUENTE: EVOLUCIÓN HASTA EL ESTADO MUERTO, PRODUCIENDO EL MÁXIMO TRABAJO POSIBLE, PERO INTERACCIONANDO CON CALOR SÓLO CON EL MEDIO AMBIENTE.⁵

LA EXERGIA (A) ES EL MÁXIMO TRABAJO QUE PODRÍA EXTRAERSE DEL SISTEMA EN EL PROCESO HASTA EL EQUILIBRIO CON EL AMBIENTE O ESTADO MUERTO:

$$W_{\text{util max}}^{1 \rightarrow 0} = A_1 = (E_1 - U_0) - T_0(S_1 - S_0) + P_0(V_1 - V_0) \quad [\text{J}] \quad (3)$$

LA DIFERENCIA DE EXERGÍA ENTRE DOS ESTADOS ($A_1 - A_2$) INDICA LA DISMINUCIÓN DE ENERGÍA UTILIZABLE, ES DECIR, EL MÁXIMO TRABAJO ÚTIL QUE SE PODRÍA OBTENER EN ESE CAMBIO DE ESTADO:

⁴ GÖRAN WALL, EXERGY A USEFUL CONCEPT, PHYSICAL RESOURCE THEORY GROUP, 3RD EDITION, PAG.48, GÖTEBORG 1986.

⁵ GOMEZ-ACEBEDO T., TERMODINÁMICA, UNIVERSIDAD DE NAVARRA, CAMPUS TECNOLÓGICO, TEMA 12, PAG.12.2 SAN SEBASTIÁN, ESPAÑA, 2001

$$\boxed{W_{\text{util max}}^{1 \rightarrow 2} = A_1 - A_2 = (E_1 - E_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_1 - V_2)} \quad (4)$$

EL BALANCE DE EXERGÍA PARA SISTEMAS NO FLUENTES (FIG.2)

$$\boxed{A_2 - A_1 = \underbrace{\int_1^2 \delta Q \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)}_{\text{Exergia asociada al calor, } e^Q} - \underbrace{[W - P_0(V_2 - V_1)]}_{\text{Exergia asociada al trabajo (trabajo útil), } W_u} - \underbrace{T_0 \sigma}_{\text{Irreversibilidad o pérdida de exergia, } I} \quad (5)$$

EXERGIA PARA SISTEMAS FLUENTES O ABIERTOS

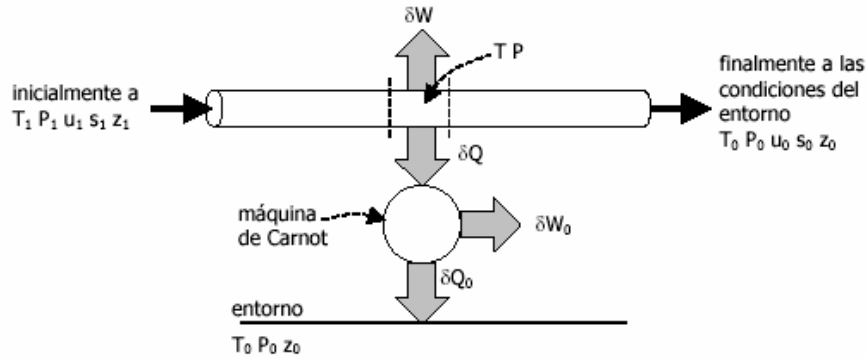


FIG. 3. ESQUEMA PARA EL CÁLCULO DE LA EXERGIA DE UN SISTEMA DE FLUJO ESTACIONARIO⁶

LA EXERGÍA PARA UN SISTEMA FLUENTE (B) ES EL MÁXIMO TRABAJO QUE PODRÍA EXTRAERSE DE UN FLUIDO ESTACIONARIO DE CAUDAL $\dot{m}$ EN EL PROCESO HASTA EL EQUILIBRIO CON EL AMBIENTE O ESTADO MUERTO:

$$\boxed{\dot{W}_{\text{util max}}^{1 \rightarrow 0} = \dot{B}_1 = \dot{m}[(h + e_p + e_c)_1 - h_0] - \dot{m}T_0(s_1 - s_0)} \quad [\text{W}] \quad (6)$$

SI EL FLUIDO CAMBIA DEL ESTADO 1 AL 2, LA VARIACIÓN DE LA EXERGIA ($B_1 - B_2$):

$$\boxed{\dot{W}_{\text{util max}}^{1 \rightarrow 2} = \dot{B}_1 - \dot{B}_2 = \dot{m}[(h + gz + c^2/2)_1 - (h + gz + c^2/2)_2] - \dot{m}T_0(S_1 - S_2)} \quad (7)$$

EL BALANCE DE EXERGIA EN LA FIG. 3.

$$\boxed{b_2 - b_1 = \underbrace{\int_1^2 \delta q \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right)}_{\text{Exergia asociada al calor, } e^Q} - \underbrace{W_u}_{\text{Exergia asociada al trabajo (trabajo útil), } W_u} - \underbrace{T_0 \sigma}_{\text{Irreversibilidad o pérdida de exergia, } I} \quad (8)$$

ENERGÍA, EXERGIA Y ANERGIA

COMO PUEDE VERSE LA INTRODUCCIÓN DE LA EXERGIA PERMITE INTEGRAR SIMULTÁNEAMENTE A LA ENERGÍA Y LA ENTROPÍA⁷ Y ESTABLECER A DIFERENCIA DE QUE

⁶ GOMEZ-ACEBEDO T., TERMODINÁMICA, UNIVERSIDAD DE NAVARRA, CAMPUS TECNOLÓGICO, TEMA 12, PAG.12.5 SAN SEBASTIÁN, ESPAÑA, 2001

⁷ GÖRAN WALL, EXERGY A USEFUL CONCEPT, PHYSICAL RESOURCE THEORY GROUP, 3RD EDITION, PAG.48, GÖTEBORG 1986.

LA ENERGÍA SE CONSERVA, LA EXERGÍA SE PUEDE DESTRUIR Y QUE ESTA DESTRUCCIÓN ESTÁ VINCULADA CON LAS IRREVERSIBILIDADES DE LOS PROCESOS Y POR LO TANTO ESTO SIGNIFICA UNA PÉRDIDA DE CAPACIDAD DE TRABAJO:

$$I = T_0 \sigma = T_0 \left[(S_f - S_i)_{\text{sist.}} - \sum_f \frac{Q_f}{T_f} \right] \quad (9)$$

ECUACIÓN DE GOUY-STODOLA

ESTA DEFINICIÓN DE LA EXERGÍA ÍNTIMAMENTE LIGADA A LA NATURALEZA IRREVERSIBLE DE LOS PROCESOS REALES PERMITE DEFINIR UNA SERIE DE CONCEPTOS QUE REDIMENSIONAN LA PERCEPCIÓN Y EL USO DE RECURSOS VINCULADOS CON UN MEJOR MANEJO DE LA ENERGÍA:

$$\text{ENERGÍA} = \text{EXERGIA} + \text{ANERGIA} \quad (10)$$

DONDE LA ANERGIA ES LA PARTE DE LA ENERGÍA QUE NO PUEDE SER APROVECHADA Y ASÍ SE RATIFICA QUE LA EXERGIA ES LA PARTE DE LA ENERGÍA QUE PUEDE CONVERTIRSE COMPLETAMENTE EN CUALQUIER OTRA FORMA DE ENERGÍA (RAND 1956).

CONCLUSIONES

COMO PUEDE VERSE A LO LARGO DE ESTE ARTÍCULO LOS RECURSOS CON LOS CUALES SE PUEDE LLEGAR A LAS DEFINICIONES BÁSICAS VINCULADAS CON LA EXERGIA, SE ENCUENTRAN AL ALCANCE Y SON UNA EXTENSIÓN NATURAL DE NUESTROS CONCEPTOS TERMODINÁMICOS PRIMEROCENTRISTAS, ASPECTO QUE HACE FACTIBLE SU INSERCIÓN EN LOS CONTENIDOS DE LA TERMODINÁMICA PARA LA ENSEÑANZA EN LOS NIVELES DE LICENCIATURA DE LA INGENIERÍA.

HABILITAR EL USO DE LA EXERGIA COMO RECURSO EN EL ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA, SIGNIFICARÁ POTENCIAR CAPACIDADES DE ANÁLISIS PARA ESTABLECER DE FORMA MÁS CERTERA RESPUESTAS A PREGUNTAS TALES COMO:

¿CUAL ES LA MÁXIMA VELOCIDAD QUE PUEDE ADQUIRIR UN FLUJO DE ALTA PRESIÓN A TRAVÉS DE UNA MANGUERA?

¿CUAL ES EL MÁXIMO TRABAJO QUE SE PUEDE OBTENER DE UN PROCESO DE EXPANSIÓN EN DONDE PUEDEN INTERVENIR PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN O VAPOR?

¿CUAL ES EL MÍNIMO GASTO DE ENERGÍA REQUERIDO PARA REFRIGERAR UN PRODUCTO?

LA CAPACIDAD DE TENER UN RECURSO QUE PUEDA RESPONDER ESTAS PREGUNTAS SIGNIFICARÁ TENER UNA HERRAMIENTA ESTRATÉGICA PARA EL USO EFICIENTE, NO SOLO DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS, SI NO TAMBIÉN PARA USO EFICIENTE Y RACIONAL DE LAS MATERIAS PRIMAS.

LA APERTURA DE ESTE RINCÓN DE LA TERMODINÁMICA AL QUE NORMALMENTE LO EVITAMOS POR LO DIFÍCIL DE ENCONTRAR LOS RECURSOS DIDÁCTICOS PARA SU ENSEÑANZA Y LO ESPINOSO QUE ES ENCARAR EN TERMINOS CONCEPTUALES LA ENTROPÍA, PERMITE REPLANTEAR LA PERCEPCIÓN DE LA TERMODINÁMICA Y PROMOVER LA APERTURA A NUESTROS FUTUROS PROFESIONALES PARA INTEGRARSE A UNA CORRIENTE MULTIDISCIPLINARIA RELATIVAMENTE RECIENTE QUE ESTA TENIENDO UN ALTO IMPACTO EN EL REPLANTEO DEL ANÁLISIS DE NUESTRO ENTORNO A TRAVÉS DE LA TERMOCAPACIDAD, QUE A SU VEZ SIGNIFICARÁ LA INTEGRACIÓN A TODA UNA PLATAFORMA CIENTÍFICA, FILOSÓFICA Y POLÍTICA QUE ABARCA DISCIPLINAS TALES COMO: LA ECONOMÍA, LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN, LA MODELACIÓN DE ENTORNOS BIOLÓGICOS, ETC., QUE ES EL SUSTENTO DE CORRIENTES DE CUESTIONAMIENTO DEL

ACTUAL MODELO ECONÓMICO, PUES EL USO ACTIVO DE LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA LA COMPROMETE CON LAS LÍNEAS MÁS VITALES DE NUESTRAS VIDAS: ...LO FINITO DE LOS RECURSOS DE NUESTRO PLANETA Y LA INEQUIDAD EN EL REPARTO DE ESTAS RIQUEZAS.

BIBLIOGRAFIA

1. ANDRADE TORRES E., ANÁLISE EXERGETICA, UNIVERSIDAD FEDERAL DE BAHIA, ESCOLA POLITÉCNICA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BRASIL, AGOSTO 2001.
2. FRANCIS F. HUANG, INGENIERÍA TERMODINÁMICA, COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL S.A., MÉXICO, 1994.
3. GOMEZ-ACEBEDO T., TERMODINÁMICA, UNIVERSIDAD DE NAVARRA, CAMPUS TECNOLÓGICO, SAN SEBASTIÁN, ESPAÑA, 2001
4. GÖRAN WALL, EXERGY A USEFUL CONCEPT, PHYSICAL RESOURCE THEORY GROUP, 3RD EDITION, GÖTEBORG 1986.
5. MENDIZABAL LUIZAGA EDMUNDO, TERMODINAMICA TECNICA (MEC 244), ED. CALAMA, LA PAZ-BOLIVIA, 1992
6. SHUKUYA M., HAMMACHE A., INTRODUCTION TO THE CONCEPT OF EXERGY – FOR OA BETTER UNDERSTANDING OF LOW-TEMPERATURE-HEATING AND HIGHT-TEMPERATURE-COOLING SYSTEMS, ED. MARJA KETTUNEN, FINLAND, 2002
7. WILLIAM L. HABERMAN, JAMES E.A. JOHN, TERMODINÁMICA PARA INGENIERÍA CON TRANSFERENCIA DE CALOR, EDIT. TRILLAS, 1996.