



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Modelo termodinámico del corazón

Thermodynamic model of the heart

Autor

Elisa Zamora Martínez

Director

José María Marín Herrero

(Departamento de ingeniería mecánica)

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza
Agosto 2017

RESUMEN

MODELO TERMODINÁMICO DEL CORAZÓN

Este trabajo de fin de grado se centra en la elaboración de un modelo numérico que simule el comportamiento de un órgano vivo. Dicho modelo resulta de la aplicación de las leyes termodinámicas por las cuales se rigen los procesos químicos implicados en la producción de energía. El corazón es el órgano vivo a estudio, al comportarse como una bomba pulsátil involuntaria que realiza trabajo de contracción para bombear la sangre.

En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica para conocer la fisiología del corazón y así, entender el funcionamiento del mismo como una máquina natural y su semejanza a las máquinas termodinámicas conocidas. Para ello, es necesario entender el funcionamiento del sistema cardiovascular y de los tejidos y fluidos que lo componen. Así como, el proceso por el cual se obtiene la energía química necesaria para producir el trabajo de contracción del corazón (metabolismo celular).

Tras esta revisión, se aprecia como el corazón realiza un trabajo de contracción para bombear la sangre y mantener la homeostasis del cuerpo humano, permitiendo que todos los órganos realicen el metabolismo celular. La energía química que se produce en las células cardíacas (o miocárdicas) que forman el corazón, es invertida una parte, en dicho trabajo de contracción y el resto se disipa en forma de calor. Este proceso permite realizar el balance energético del corazón, que forma parte del modelo numérico y proporciona información, entre otras cosas, de la eficiencia cardíaca y la potencia mecánica de bombeo del mismo.

El modelo consta también de un cálculo de los flujos que intervienen en la producción de energía del corazón. Es decir, se puede conocer los caudales de nutrientes y desechos que contienen los flujos de las arterias coronarias (encargadas de nutrir las células cardíacas).

Por último, se completa con un balance exergético, que puede determinar, junto al balance energético, la influencia que las diferentes patologías tienen sobre el funcionamiento del corazón. Este balance se aplica a las reacciones oxidativas que tienen lugar en las células miocárdicas para la producción de energía metabólica.

El modelo se ha aplicado al corazón de un individuo adulto, sano y en reposo, para obtener los valores estándar. Y a su vez, a un paciente de hipertiroidismo para conocer, la influencia de que dicha patología tiene sobre el corazón.

Se demuestra que la enfermedad, a pesar de no ser de carácter cardíaco, ya que se trata de una patología que afecta a la glándula tiroidea, produce alteraciones muy importantes en el funcionamiento del corazón. De tal manera que la eficiencia cardíaca aumenta en un 23 % en personas con dicha patología. A pesar de ello, los valores que se alcanzan no son muy elevados, ya que, en personas sanas, solo un 15 % de la energía es invertida en forma de trabajo. Este aumento es debido, en parte, a que el trabajo de contracción aumenta en un 115 % en pacientes con hipertiroidismo. Lo mismo sucede con la exergía destruida por el corazón, su aumento es de casi el 70 %.

Finalmente, destacar la importancia de este modelo como herramienta no solo para la detección de patologías, si no también para el estudio del comportamiento del corazón ante diferentes niveles de esfuerzo físico.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dña. Elisa Zamora Martínez

con nº de DNI 73023207R en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Ingeniería de tecnologías industriales, (Título del Trabajo) Modelo termodinámico del corazón

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 31 de Agosto de 2017

Fdo: Elisa Zamora Martínez

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos y alcance.....	3
1.2. Trabajo previo en el que se apoya.....	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Sistema circulatorio.....	5
2.1.1. Corazón.....	6
2.1.2. La sangre.....	11
2.2. Metabolismo celular.....	12
2.2.1. <i>Sustancias que intervienen en el metabolismo celular</i>	13
3. MODELADO NUMÉRICO	15
3.1. Balance energético.....	15
3.2. Flujos de sangre en el corazón.....	18
3.3. Balance exergético.....	20
4. APLICACIÓN DEL MODELO DEL CORAZÓN A PACIENTES CON HIPERTIROIDISMO	23
4.1. Hipertiroidismo.....	23
4.2. Modelo numérico aplicado.....	23
5. CONCLUSIONES	27
6. BIBLIOGRAFÍA.....	29
ANEXO A. Índice de figuras, gráficos y tablas.....	31
A.1. Figuras.....	31
A.2. Gráficos.....	31
A.3. Tablas.....	31
ANEXO B. Definiciones	33
ANEXO C. Nomenclatura	34
ANEXO D. Metabolismo celular.....	38
D.1. Energía metabólica.....	38
D.2. Reacciones metabólicas. Proceso de oxidación de los nutrientes.....	39

ANEXO E. Datos bibliográficos necesarios para la resolución del modelo numérico	40
E.1. Flujos de sangre en el corazón.....	40
E.2. Balance de exergía.....	41
ANEXO F. Modelo numérico en el programa EES	43
ANEXO G. Resultados del modelo para condiciones estándar	47
G.1. Blanace de energía.....	47
G.2. Flujos de sangre en el corazón.....	47
G.3. Blanace de exergía.....	48
G.4. Datos de los compuestos.....	49
ANEXO H. Hipertiroidismo	50
ANEXO I. Resultados del modelo para individuo con hipertiroidismo.....	52
I.1. Blanace de energía.....	52
I.2. Flujos de sangre en el corazón.....	52
I.3. Blanace de exergía.....	53
I.4. Datos de los compuestos.....	54

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de fin de grado pretende ilustrar como la ingeniería puede servir de herramienta para resolver problemas del ámbito sanitario. En concreto, se basa en la aplicación de leyes termodinámicas a organismos vivos para poder determinar la existencia o influencia de patologías sobre los mismos.

1.1. Objetivos y alcance

El objetivo de este trabajo consiste en la realización del modelado de un órgano vivo como una máquina térmica. El órgano a estudio es el corazón humano, por ser al tratarse el más importante del organismo y asemejarse a una bomba automática debido a su funcionamiento y fisiología.

El modelo surge de la aplicación de las leyes termodinámicas a las condiciones concretas del organismo a estudio. Una vez obtenido el modelo termodinámico del corazón bajo unas condiciones estándar (individuo adulto, sano y en reposo), se pueden conocer los efectos que tienen diferentes situaciones sobre su funcionamiento. Introduciendo los datos proporcionados por pruebas de esfuerzo en el modelo e interpretando los parámetros obtenidos, se puede conocer la influencia de diferentes niveles de actividad física, así como el funcionamiento del corazón con cada patología cardiaca, la evolución hacia futuras enfermedades, etc.

El alcance de este proyecto es la modelización del corazón según las leyes termodinámicas, por las cuales se rigen los procesos químicos implicados en la producción de energía en los seres vivos. El corazón es un claro ejemplo al producir energía para poder contraerse y bombear la sangre de forma involuntaria. El modelo se basa en la realización de dos balances principales:

- Balance energético (primera ley termodinámica): en cualquier proceso físico o químico, la cantidad total de energía en un sistema y su entorno permanece constante, aunque la energía puede transformarse [1].
- Balance exergético, donde además se engloba la segunda ley la cual determina que en todos los procesos naturales aumenta la entropía del universo. Por lo tanto, en los sistemas biológicos el orden que se crea se compensa con el desorden que se genera en el entorno [1].

Para la realización de este trabajo se ha requerido de tres etapas de desarrollo diferentes:

- 1) En primer lugar, se lleva a cabo una profunda revisión bibliográfica con la finalidad de entender el funcionamiento de las máquinas naturales, así como su semejanza con las máquinas térmicas conocidas. Para ello, se han consultado numerosos libros de fisiología, que aparecen recogidos en la bibliografía.
- 2) A continuación, y con los conocimientos adquiridos, se realiza la aplicación de las leyes termodinámicas sobre el corazón para desarrollar el modelo numérico. Dicho modelo consiste en la aplicación de los balances de energía y de exergía sobre el corazón, así como el cálculo adicional de los flujos de entrada y salida del músculo cardíaco. Para una correcta y rápida resolución de las ecuaciones y debido a la abundancia de las mismas, se utiliza la herramienta “*Engineering equation solver (EES)*”.
- 3) Por último, y para demostrar la utilidad del modelo realizado, se estudia un caso práctico. Se analiza la influencia del hipertiroidismo en el corazón, enfermedad muy frecuente y de gran importancia, que afecta, como se verá más adelante al corazón humano.

1.2. Trabajo previo en el que se apoya

Los campos de estudio que engloba la ingeniería están cada vez más ligados al ámbito sanitario. Numerosos autores desarrollan el modelado de organismos vivos con el fin de entender su funcionamiento, y las patologías que sufren o intentar dar solución a problemas sanitarios existentes.

Este trabajo se apoya en publicaciones donde se aplica la termodinámica sobre organismos vivos. Un ejemplo muy importante son los documentos escritos por el biofísico Harold J. Morowitz, en concreto en el libro [2], que trata los fenómenos termodinámicos en procesos biológicos como la fotosíntesis.

En los últimos años, numerosos autores han aplicado el análisis energético y exergético a organismos vivos con diversas finalidades como el tratamiento y diagnóstico de enfermedades. Son estos artículos los que han servido de referencia y motivación para la realización del trabajo. El primero en utilizar estas herramientas fue Prek M. [3], demostrando que la exergía metabólica es uno de los parámetros más relevantes del balance exergético de cualquier organismo vivo.

El modelo termodinámico de un organismo se ha utilizado en numerosos estudios para determinar, no solo la influencia de patologías como en la publicación [4], sino también el comportamiento de dicho organismo bajo diferentes niveles de actividad física, cuya influencia se explica en el artículo [5]. Estos últimos estudios son de gran utilidad en pacientes que acaban de sufrir o con tendencia a sufrir una cardiopatía isquémica^(*) [6].

El trabajo se ha estructurado en diferentes secciones siguiendo las etapas de desarrollo realizadas para alcanzar el objetivo del mismo. En primer lugar, se realiza una sección donde se explica de forma resumida la revisión bibliográfica que se ha realizado para llevar a cabo el modelado del corazón. En ella se detalla la composición del sistema cardiovascular al que pertenece, y el proceso por el cual se obtiene la energía que permite su movimiento (metabolismo celular). A continuación, se dedica una sección a detallar los pasos seguidos para la obtención del modelo, es decir, del balance energético y exergético que lo componen. Por último, se aplica el modelo obtenido a un caso práctico, para demostrar la utilidad del mismo y las futuras aplicaciones que puede tener en el ámbito sanitario. El caso práctico seleccionado es el hipertiroidismo, una enfermedad hormonal que puede afectar entre otros al sistema cardiovascular.

Los datos obtenidos por el modelo a lo largo del trabajo son contrastados con publicaciones existentes para demostrar la validez del modelo.

Los anexos recogen información adicional necesaria para completar el trabajo. En el anexo A se puede encontrar un índice con todas las figuras, gráficos y tablas utilizadas a lo largo del trabajo. Los *anexos B* y *C* contienen las definiciones de términos complejos, así como la nomenclatura utilizada. El *anexo D* y *H* explican en profundidad algunos términos explicados en las secciones. El *D* detalla el metabolismo celular y la producción de energía, mientras que el *H* explica los efectos y causas del hipertiroidismo. El *anexo E* recoge los datos literarios necesarios para realizar el modelo y el *F*, el modelo realizado con la herramienta “EES”. Por último, los *anexos F* y *G* reúnen los resultados obtenidos en el modelo para cada uno de los casos evaluados (individuos sanos, condiciones estándar e individuos con hipertiroidismo).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como ya se ha mencionado, antes de estudiar la fisiología del corazón y con la finalidad de entender mejor su funcionamiento, se debe realizar una revisión bibliográfica. Con ella se pretende conocer el sistema circulatorio entendiendo el importante papel que tiene el corazón en él, y el metabolismo celular para conocer la fuente de la energía necesaria para moverlo.

2.1. Sistema circulatorio

El sistema circulatorio supone uno de los sistemas más importantes del cuerpo humano, ya que mantiene un entorno apropiado en los líquidos tisulares^(*) del organismo, con la finalidad de la supervivencia y el correcto funcionamiento de todas las células que lo componen. Ayuda a que pueda llevarse a cabo el metabolismo celular de todos los tejidos, al transportar los nutrientes y eliminar los deshechos metabólicos. También transporta las hormonas de una parte del organismo a otra [7].

La circulación está dividida en circulación pulmonar o menor, que lleva la sangre hasta los pulmones, y la circulación sistémica, periférica o mayor, que es la encargada de transportar la sangre hasta los tejidos periféricos. La *Figura 1* ilustra las dos circulaciones principales [7].

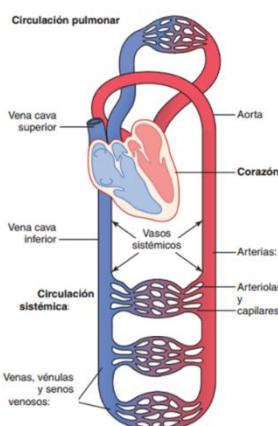


Figura 1. Circulaciones principales del sistema cardiovascular y las redes de distribución sanguínea [7].

Para cumplir de forma eficiente el transporte de nutrientes, deshechos y hormonas, se necesita que el sistema circulatorio esté compuesto por un circuito con una única dirección y sentido irreversible (circulación unidireccional) [8]. Para ello se deben cumplir unos requisitos mínimos que son realizados por los diferentes componentes del sistema:

- La amplia red de arterias, capilares y venas que forman el sistema cardiovascular componen el circuito por el que circula la sangre [8].
- El corazón supone una bomba automática con la energía suficiente para mover la sangre a lo largo del circuito [8]. Tiene la capacidad de bombear un 300 - 400 % más de sangre de la que necesita el cuerpo humano en reposo [9].
- Una serie de válvulas situadas en el corazón aseguran el carácter unidireccional del circuito, impidiendo el reflujo de la sangre [8].

- *Red de circulación sanguínea [9]*

Antes de hablar del componente principal del sistema circulatorio, el corazón, se debe conocer el resto de componentes funcionales que forman la red de circulación de sangre.

Esta red se puede dividir en el sistema arterial y en el venoso. El sistema arterial posee unas paredes más gruesas que el venoso ya que transporta sangre a mayores presiones. Está formado por arterias que se van ramificando en vasos de menor tamaño, hasta las arteriolas, que son las predecesoras de los capilares. Se consideran arterias a todos los vasos que están entre el corazón y el territorio capilar.

Por otra parte, los vasos que componen el sistema venoso son todos aquellos que recogen la sangre desde los territorios capilares, denominadas venas o vénulas. En la mayoría de los casos se dirigen al corazón, pero en algunos de los puntos, la sangre vuelve a pasar por un territorio capilar, por ejemplo la sangre que viene de los capilares intestinales y vuelve a pasar por los capilares hepáticos^(*). Debido a su pequeño tamaño en comparación con las arterias, suponen un reservorio de sangre para los momentos en los que se pueda incrementar el gasto cardiaco.

Los capilares son los encargados de que se produzca esta diferencia entre ambos sistemas, ya que entran en contacto con los tejidos y se encargan del intercambio de líquidos, nutrientes y otras sustancias presentes en la sangre, modificando la composición de la sangre transportada.

2.1.1. Corazón

Se ha hablado en términos muy generales del funcionamiento y la composición del sistema cardiovascular, pero se debe hacer gran hincapié en la importancia del corazón. Como ya se ha mencionado con anterioridad, es la bomba automática responsable de mover la sangre a lo largo del sistema circulatorio. Por lo que es el principal responsable de que a las células de los tejidos del organismo les lleguen los nutrientes, proteínas, hormonas... necesarios para su supervivencia.

El corazón es una víscera^(*) única, hueca y de paredes musculares, situado en el centro del tórax, como se puede ver en la *Figura 2* [8]. Está formado por tejido muscular estriado cardíaco (o miocardio). Este tipo de tejido es similar al tejido voluntario que constituye el aparato locomotor, pero con algunas diferencias. La principal diferencia es que el tejido muscular cardíaco es de contracción involuntaria y rítmica, ya que sus células son capaces de autoestimularse y desencadenar la contracción sin precisar de influencias externas, característica necesaria para desempeñar su función en el aparato cardiovascular. Otra diferencia importante desde el punto de vista metabólico es que es básicamente aerobio, puesto que contiene más mitocondrias [8].

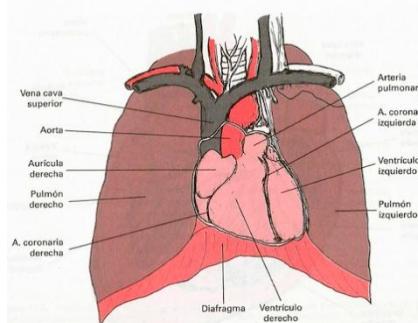


Figura2. Anatomía externa y relaciones anatómicas del corazón [8].

A pesar de hablar del corazón como una única víscera, está dividido en dos cámaras totalmente independientes entre sí que funcionan como dos bombas en serie. Es por lo que se habla del corazón derecho y el izquierdo. Cada cámara es una bomba pulsátil formada por una aurícula de pared delgada (bomba débil de cebado del ventrículo) y un ventrículo de pared gruesa (aporta la principal fuerza para bombear la sangre) [9].

Estas dos cámaras pueden funcionar de forma independiente y tienen rasgos funcionales diferentes, dividiendo el sistema circulatorio en dos territorios. El territorio pulmonar, que constituye la sangre que sale del ventrículo derecho por la arteria pulmonar y entra a la aurícula izquierda por la vena pulmonar, pasando por los pulmones. Y el territorio sistémico, que comprende la sangre que sale del ventrículo izquierdo por la arteria aorta, pasa por el resto de tejidos del organismo, y vuelve a la aurícula derecha por la vena cava. La *Figura 3* ilustra la división del corazón en dos cámaras y el conjunto de válvulas que lo forman [9].

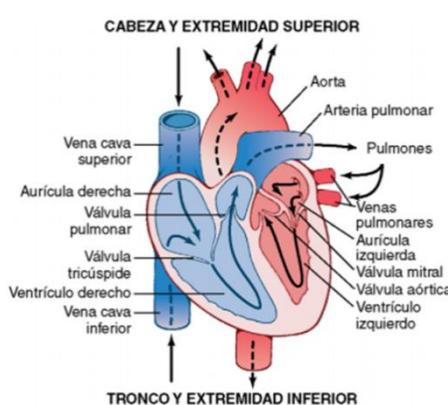


Figura 3. Estructura del corazón y trayecto del flujo sanguíneo a través de las cavidades cardíacas y de las válvulas cardíacas [9].

El corazón debe presentar un conjunto de válvulas que se cierran y abren pasivamente impidiendo el reflujo de la sangre en el circuito, proporcionando así el carácter unidireccional al sistema circulatorio. Las válvulas del corazón se pueden dividir en válvulas auriculoventriculares, que comunican el ventrículo y la aurícula e impiden el flujo de sangre retrogrado hacia las aurículas durante la sístole (denominadas tricúspide para la cámara derecha y mitral para la izquierda). Y las válvulas semilunares, que comunican los ventrículos con las arterias de salida de sangre (denominada pulmonar, comunica el ventrículo derecho con la circulación pulmonar y aórtica la que comunica el ventrículo izquierdo con la circulación sistémica). Las válvulas semilunares son mucho más fuertes y precisan de un flujo retrógrado bastante rápido durante algunos milisegundos [8].

La premisa básica de la mecánica cardiaca determina la apertura de las válvulas, ya que la sangre fluye siempre desde el punto de mayor presión, al de menor, provocando así su apertura [8]. Este fenómeno se ve con más detalle en la explicación del ciclo cardiaco.

- *Ciclo cardiaco* [9]

La suma de todos los fenómenos que permiten al corazón funcionar como una bomba, es decir, que le permiten contraerse para expulsar la sangre a la arteria correspondiente en cada latido, se denominan ciclo cardiaco. Dura desde que comienza un latido hasta que se produce el siguiente.

Como su propio nombre indica, se trata de un fenómeno continuo, pero para poder ser explicado mejor, se puede empezar desde la diástole^(*) ventricular. El ventrículo se relaja y se llena de sangre procedente de la aurícula, lo que provoca un aumentado progresivo de su presión. Al final de la relajación, una contracción en la aurícula permite un paso de sangre adicional. Aproximadamente un 80 % de sangre del ventrículo, se llena directamente de la aurícula, mientras que el 20 % restante es llenado tras la contracción auricular. Por tanto, las aurículas aumentan en un 20 % la eficiencia del bombeo ventricular.

A continuación comienza la sístole^(*) ventricular, donde el ventrículo presenta una mayor presión que la aurícula, por lo que la válvula auriculoventricular correspondiente se cierra, impidiendo así el reflujo sanguíneo.

El comienzo de la contracción ventricular se produce sin cambios volumétricos en el mismo, ya que la presión de la arteria es mayor e impide que se abra la válvula semilunar correspondiente. La presión aumenta progresivamente, provocando la apertura de la válvula y la expulsión de sangre hacia la arteria que conducirá la sangre a los tejidos periféricos.

Como la válvula auriculoventricular se encuentra cerrada, el ventrículo no se llena durante la contracción. Cuando éste ha expulsado parcialmente toda la sangre, el ventrículo comienza a relajarse, produciéndose de nuevo la diástole e iniciando el ciclo.

Estos fenómenos se producen de igual manera en ambas cámaras del corazón, pero en el corazón derecho se produce a presiones más bajas, ya que el ventrículo tiene una pared muscular más delgada. Esto se debe también a que la resistencia al flujo del territorio pulmonar es menor. El corazón derecho debe impulsar sangre pobre en oxígeno.

Cada ciclo cardíaco es iniciado por la generación espontánea de un potencial de acción^(*) en el nódulo sinusal^(*). Este se encuentra localizado en la pared superolateral de la aurícula derecha, cerca del orificio de la vena cava superior, y el potencial de acción viaja desde aquí rápidamente por ambas aurículas y después hacia los ventrículos. Debido a esta disposición, se produce un retraso de más de 0,1 segundos durante el paso del impulso cardíaco desde las aurículas a los ventrículos. El retraso se representa en forma de meseta, a diferencia del potencial de acción del músculo esquelético, como se puede apreciar en la *Figura 4* [9]. Este fenómeno permite que se produzca la contracción auricular antes que la ventricular, permitiendo así el llenado del ventrículo. Ahora se puede entender mejor, porque las aurículas funcionan como bomba de cebado para los ventrículos.

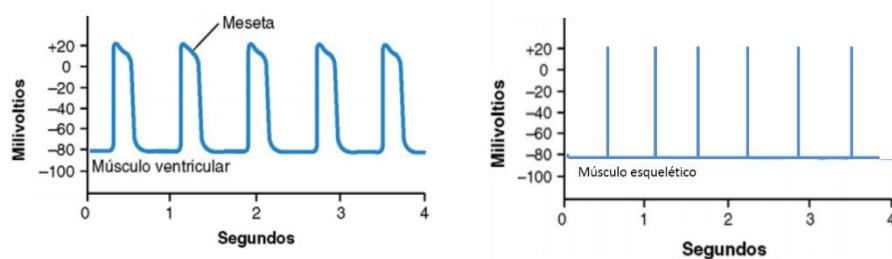


Figura 4. Potencial de acción correspondiente al músculo ventricular (izq.) y al músculo esquelético (drch.) [9].

La *Figura 5* ilustra los cambios de presión y volumen en las diferentes arterias y ventrículos para la cámara izquierda del corazón (la más representativa al alcanzar mayores presiones) [9].

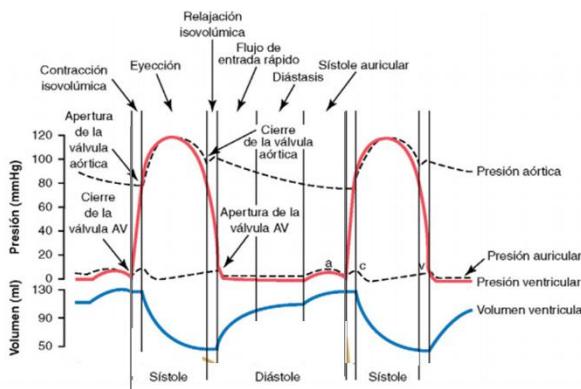


Figura 5. Acontecimientos del ciclo cardíaco para la función del ventrículo izquierdo [9].

Una vez conocido en detalle el funcionamiento del corazón en cada ciclo, se puede entender mejor el recorrido de la sangre.

Durante la sistole ventricular, la sangre pobre en oxígeno y rica en nutrientes proveniente del retorno venoso es expulsada desde el corazón derecho hasta los pulmones, a través de la arteria pulmonar. Es en estos donde se produce el intercambio gaseoso, por medio de los alveolos^(*) que, al entrar en contacto con el aire atmosférico, son capaces de expulsar el dióxido de carbono (deshecho metabólico) y captar el oxígeno. La sangre sale de los pulmones rica en oxígeno y entra al corazón izquierdo para, después de un latido, ser expulsada hacia los órganos periféricos.

Por medio de los capilares, la sangre, intercambia en los órganos, los nutrientes y el oxígeno necesarios para que las células realicen el metabolismo celular. A su vez, recoge los desechos metabólicos. La sangre que vuelve por el retorno venoso es rica en nutrientes, ya que, en el aparato digestivo, no solo los aporta, sino que los capta provenientes de la digestión de los alimentos.

De este modo la sangre del retorno venoso de nuevo volvería al corazón derecho, repitiéndose el ciclo.

- *Contracción cardiaca y generación de trabajo*

El corazón es una bomba pulsátil automática que impulsa una cantidad de flujo durante un periodo de tiempo determinado. Como toda bomba, debe tener un aporte de energía que pueda ser invertido en la producción de trabajo externo [10].

Posee una serie de mecanismos especiales que producen una sucesión continua de contracciones denominada ritmicidad cardiaca. Dichas contracciones transmiten un potencial de acción por todo el músculo cardíaco y determinan su latido rítmico [9].

La cantidad de energía que el corazón convierte en trabajo de contracción en cada latido se denomina trabajo sistólico. El corazón lo utiliza de dos maneras diferentes. En primer lugar, y más importante, se utiliza en trabajo externo de contracción para mover la sangre por el sistema circulatorio. En segundo lugar, se utiliza para acelerar la sangre hasta su velocidad de eyección a través de las válvulas aórtica y pulmonar (válvulas semilunares) [9].

La *Figura 6* muestra el grafico de bombeo ventricular izquierdo, que representa de forma gráfica la producción de trabajo de contracción en el corazón [9]. La bibliografía médica hace más énfasis en el ventrículo, al tratarse la aurícula de una bomba de cebado que ayuda al llenado del ventrículo.

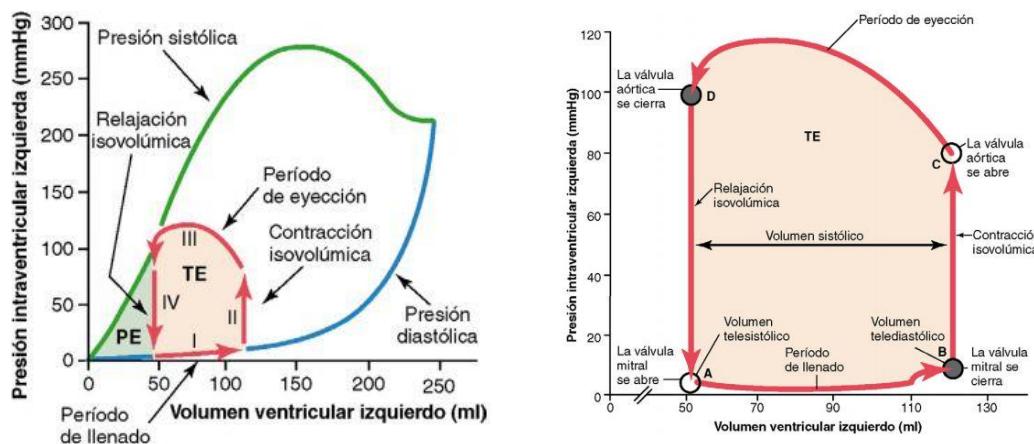


Figura 6. Relación entre el volumen ventricular izquierdo y la presión intraventricular durante un latido [9].

En este gráfico, se ilustran con las curvas verdes y azules la evolución del volumen y la presión ventricular, como se ha descrito en el ciclo cardiaco. El diagrama volumen-presión en rojo muestra la evolución de los mismos en el ventrículo izquierdo y la generación de trabajo externo. Se puede dividir en cuatro períodos diferentes que se producen en cada latido [9]:

- Período de llenado. Este período comienza a un volumen ventricular bajo, el que ha quedado en el ventrículo después del latido previo (volumen telesistólico, punto A). Como ya se ha visto antes, durante el llenado del ventrículo, el volumen aumenta, sin producirse un aumento significativo de la presión, alcanzándose finalmente el volumen y la presión telediastólica (punto B).
- Período de contracción isovolumétrica. El volumen del ventrículo no se modifica ya que todas las válvulas están cerradas. Sin embargo, la presión ventricular va aumentando hasta igualar a la de la arteria aorta (punto C).
- Período de eyección. Durante la eyección de sangre, la presión sistólica aumenta incluso más debido a una fuerte contracción del ventrículo. Al mismo tiempo, el volumen va disminuyendo debido a la apertura de la válvula aórtica.
- Período de relajación isovolumétrica. Al final de la eyección (punto D), la válvula aórtica se cierra y disminuye la presión ventricular hasta la presión diastólica, sin producirse cambios de volumen (punto A).

El área que encierra cualquier diagrama de volumen presión, representa el trabajo realizado, y en este caso, ese trabajo se traduce por el trabajo cardiaco externo, durante un ciclo cardiaco.

Cuando el corazón bombea grandes cantidades de sangre, el área del diagrama de trabajo se hace mucho mayor. Se extiende porque se contrae a mayores presiones y se expande tanto a la derecha como a la izquierda debido a que se llena con más sangre (derecha) y se contrae a un menor volumen (izquierda) [9].

- *Circulación coronaria* [11]

El sistema cardiaco se puede dividir en dos grandes sistemas, como ya se ha indicado, el mayor o sistémico y el menor o pulmonar. Se necesita además un sistema que alimente a las

células cardiacas que forman el miocardio, ya que estas producen la energía necesaria para la contracción y su correcto funcionamiento del corazón.

El sistema coronario es una ramificación directa de la arteria aorta que proporciona al miocardio sangre rica en oxígeno y nutrientes. Esta ramificación se produce en forma de pequeñas arterias coronarias que penetran en la superficie de la masa muscular cardiaca. Casi todo el aporte de nutrientes se realiza por medio de estas arterias. Solo una décima parte del corazón puede obtener su nutrición de la sangre que recorre el interior de las cámaras cardiacas. Por ello ese aporte es mínimo y, como se verá más adelante, para los cálculos numéricos se desprecia.

La nutrición del miocardio se tiene que realizar a ambas cámaras por igual, por lo que se distingue entre arteria coronaria izquierda y arteria coronaria derecha.

Esta nutrición de las células miocárdicas se produce durante la diástole, ya que el flujo muscular se relaja y ya no obstruye el flujo sanguíneo a través de los capilares musculares. De esta forma la sangre fluye rápidamente durante toda la diástole.

Tras el metabolismo celular, la sangre que es recogida por las venas coronarias del ventrículo izquierdo, drena al seno coronario^(*) y se vacía en la aurícula derecha a través de la vena cava inferior. Por otro lado, la mayoría de la sangre venosa coronaria del ventrículo derecho vuelve a través de pequeñas venas coronarias, que fluyen directamente a la aurícula derecha.

La regulación del flujo de sangre que atraviesa el riego coronario está regulada por las necesidades nutricionales del músculo, es decir, la necesidad de aumento de la contracción cardiaca y por lo tanto de consumo de oxígeno. Esta regulación, es idéntica a la que se produce en los músculos esqueléticos.

2.1.2. La sangre [12]

La sangre es el elemento líquido transportado por el sistema cardiovascular, gracias a los movimientos del corazón. Es el medio a través del cual los nutrientes, hormonas y electrolitos se desplazan. Su función no es únicamente mantener la homeostasis^(*) del organismo, si no que se encargan de la protección del mismo a través de los electrolitos que transporta. Está compuesta principalmente por el plasma y células sanguíneas.

- *Plasma*

El plasma es principalmente un medio líquido que transporta una gran cantidad de sustancias. Estas proceden del exterior o de otros órganos del cuerpo y son transportadas a otras células o eliminadas del organismo. Es un líquido transparente que está formado por agua, proteínas, electrolitos y otras sustancias.

- Agua. El plasma está formado en un 91,5 % de agua. Proviene en su gran mayoría de la absorbida por el aparato digestivo, pero una pequeña parte es el resultado del deshecho que se produce durante las reacciones químicas de las células (metabolismo). Al ser el componente principal del plasma y por tanto de la sangre, es el medio de transporte de los nutrientes y resto de componentes sanguíneos. Esto es debido a que las moléculas o grupos apolares como las grasas, tienden a agruparse dentro del agua, debido a la compresión que ejerce el agua sobre ellas. La glucosa al ser un compuesto polar se

encuentra disuelto en el agua, a diferencia de los ácidos grasos, el oxígeno y el dióxido de carbono, compuestos apolares. Los organismos han desarrollado mecanismos especiales (la hemoglobina) para poder transportar en la sangre los gases apolares (oxígeno y dióxido de carbono). Otra de sus funciones principales es que es el medio en el que tienen lugar la mayoría de las reacciones enzimáticas.

- **Proteínas plasmáticas.** Las proteínas plasmáticas comprenden un 7 % del plasma total. La mayoría se originan en el hígado o en la médula ósea^(*) y son las encargadas de la coagulación de la sangre. Además, intervienen en mecanismos de inmunidad y en una gran variedad de reacciones enzimáticas. Transportan lípidos e iones y actúan como amortiguadores para mantener el pH en límites normales.
- **Solutos restantes.** Los solutos suponen el 1,5 % restante y están constituidos por hidratos de carbono, lípidos, aminoácidos, vitaminas, hormonas y electrolitos [14]. Todos ellos son indispensables para mantener las funciones nutricionales y endocrinas. También se encuentran las sustancias de desecho como la urea^(*), el ácido úrico^(*) y dióxido de carbono.

- *Células sanguíneas*

Cuando se habla de células sanguíneas, se puede hacer distinción entre glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas. Se originan en los tejidos hematopoyéticos^(*).

- **Glóbulos rojos.** Están compuestos por un 66 % de agua y el 33 % restante es la hemoglobina, una proteína encargada de transportar el oxígeno y el dióxido de carbono. A pesar de ser el principal medio de transporte de estos dos gases, no es el único. Un 3 % del oxígeno y un 7 % del dióxido de carbono, se transporta disuelto en el plasma y menos de 1 % del dióxido de carbono se transporta también en forma de ácido carbónico tras unirse al agua.
- **Glóbulos blancos.** Células que intervienen en los fenómenos de la inmunidad del cuerpo humano.
- **Plaquetas.** Su función principal es intervenir en la hemostasia^(*), protegiendo al organismo de la pérdida de sangre por una herida o pérdida de continuidad del sistema circulatorio.

2.2. Metabolismo celular

Se debe estudiar en detalle el metabolismo celular, ya que se trata del conjunto de reacciones químicas que se producen en las células para generar energía. Esta energía es la que se invierte entre otras cosas, en trabajo de contracción en el corazón.

Los alimentos son las sustancias principales a partir de las cuales las células extraen la energía. Dentro de las células, los alimentos reaccionan con el oxígeno bajo la influencia de enzimas. Estas controlan la reacción y canalizan la energía liberada en la dirección adecuada. Este proceso es una de las vías metabólicas de las células, denominada catabolismo, por el cual se degradan y oxidan los nutrientes ricos en energía en productos finales simples, produciendo de este modo energía. Existen otras vías metabólicas para producir macromoléculas o subunidades, que requieren aporte de energía y no son de interés para este proyecto [1]. La

Figura 7 ilustra los procesos metabólicos de oxidación de los nutrientes para la generación de energía [13].

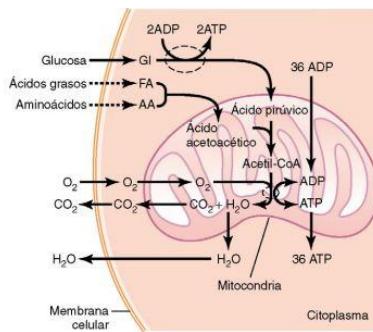


Figura 7. Formación de energía metabólica en las células [13].

Como se aprecia en la figura anterior, los alimentos reaccionan con el oxígeno produciendo los compuestos denominados deshechos metabólicos, el dióxido de carbono y el agua.

En el anexo D, se explica de forma más detallada el metabolismo celular y la formación de energía en el interior de las células.

2.2.1. Sustancias que intervienen en el metabolismo celular

Los alimentos energéticos que aportan los nutrientes necesarios para el metabolismo celular son los hidratos de carbono, los lípidos y las proteínas, compuestos presentes en una dieta equilibrada.

Las subunidades de cada uno de ellos son numerosas y no todas son utilizadas para producir energía metabólica. A demás, para dicha función no se utilizan los tres nutrientes por igual, depende del tipo de tejido, la energía se produce principalmente de la oxidación de uno de los nutrientes.

- *Hidratos de carbono*

Los productos finales de la digestión de los hidratos de carbono en el tubo digestivo son glúcidos o monosacáridos que suministran aproximadamente un 50 % del total de calorías que consumimos diariamente [1]. Estos glúcidos son principalmente glucosa, fructosa y galactosa. A lo largo del trabajo se habla únicamente de la contribución de la glucosa, porque supone un total del 80 % de los glúcidos producidos. A demás, casi toda la fructosa y galactosa se convierte en glucosa en el hígado [14].

En la mayoría de los tejidos del organismo, la oxidación de la glucosa supone un 90 % de la energía producida [14].

- *Lípidos*

Muchos compuestos químicos presentes en los alimentos se pueden clasificar como lípidos, pero son los fosfolípidos (40 % de las calorías totales que se consumen diariamente [1]), los que son de interés para la producción de energía. Tras su digestión se producen ácidos grasos, es decir ácidos orgánicos hidrocarbonados de cadena larga. De ellos, los que tienen mayor presencia en los alimentos son los ácidos esteáricos, un ácido graso saturado [15].

A pesar de que los principios básicos del metabolismo celular se aplican por igual a todas las células del organismo, en las células miocárdicas existe una diferencia importante. En condiciones de reposo el miocardio consume normalmente ácidos grasos para producir energía. En concreto, el 70 % de la energía producida proviene de los ácidos grasos. El 30 % restante, proviene de otros nutrientes, especialmente de la glucosa [14].

- *Proteínas*

Las proteínas que se ingieren con la dieta son degradadas durante la digestión hasta sus aminoácidos constituyentes [16]. En condiciones normales la oxidación de los aminoácidos solo aporta del 10 - 15 % del total de las calorías que se consumen diariamente [1], aunque en determinadas circunstancias este aporte puede ser mayor:

- En el ayuno prolongado o en la diabetes mellitus, donde el aporte energético de la glucosa es casi nulo, ya que se están degradando proteínas celulares y plasmáticas en exceso [16].
- Cuando la dieta es muy rica en proteínas, y a diferencia de los que ocurre con los hidratos de carbono y los lípidos, el exceso de aminoácidos no puede almacenarse, por lo que se debe oxidar [16].

Como las condiciones a estudio son estándar, de una persona sana y en reposo, no se contemplan las situaciones de aumento de oxidación de proteínas y pueden ser descartadas en el aporte energético global del corazón.

3. MODELADO NUMÉRICO

Los organismos vivos se pueden comprender como sistemas a los que se puede aplicar las leyes de la termodinámica con la finalidad de estudiar su comportamiento. El caso del corazón es especialmente interesante porque trabaja como una bomba cuyo rendimiento se puede calcular mediante la realización de su balance energético y exergético. Además, estos cálculos constituyen las bases necesarias para conocer la eficiencia cardiaca, el transporte de nutrientes y el comportamiento exergético del organismo bajo diferentes condiciones de actividad del individuo o ante la aparición de diferentes patologías. Supone una buena herramienta para el diagnóstico y tratamiento de las mismas.

El modelado numérico del corazón consiste en la realización de los balances energéticos y exergéticos, así como el análisis de los flujos de sangre. Para ello se asume continuidad en las operaciones, estado estacionario, y que el individuo a estudio es una persona adulta, sana y en reposo.

La nomenclatura de las ecuaciones utilizadas, los datos bibliográficos empleados y las soluciones de los análisis, se encuentran recogidas en los *anexos C, E y G*. El problema se resuelve con el software de resolución de ecuaciones “EES”, como se puede ver en el *anexo F*.

3.1. Balance energético

Como ya se ha mencionado el músculo cardíaco, al igual que el resto de tejidos que forman los órganos del cuerpo humano, utiliza la energía obtenida durante el metabolismo de los nutrientes que tiene lugar en las células miocárdicas, para realizar distintas funciones celulares. En este caso, la función principal del músculo cardíaco, consiste en la producción de trabajo mecánico de contracción. Este trabajo permite que el corazón funcione como una bomba autónoma que al contraerse en cada latido suministre sangre a los órganos periféricos y recoja los compuestos de desecho para su eliminación.

Como ya se ha mencionado en la descripción del metabolismo de los nutrientes, las células miocárdicas obtienen su energía metabólica en un 70 % de la oxidación de los ácidos grasos. El tanto por ciento restante es suministrado por otros nutrientes entre los que destaca la glucosa. Este dato difiere de la fuente de energía que emplea la mayoría de órganos del cuerpo humano, donde un 90 % aproximadamente se produce por el metabolismo oxidativo de la glucosa [14].

El corazón se puede asemejar a una bomba mecánica al invertir parte de la energía que producen sus células en potencia externa. Y como en toda bomba solo una parte de la energía invertida es convertida en dicha potencia. Durante la contracción del músculo cardíaco la mayor parte de la energía química se disipa en forma de calor [10]. El aprovechamiento de dicha energía en trabajo mecánico es lo que se conoce como eficiencia de la contracción cardiaca o eficiencia del corazón, según [8].

$$\text{Eficiencia [%]} = \frac{\dot{W}[\text{W}]}{\dot{M}[\text{W}]} \times 100 \quad (1)$$

Dicha eficiencia se calcula mediante el balance energético del corazón, el cual expresa que la energía metabólica obtenida de las células cardíacas se invierte, como ya se ha mencionado, en producir calor y potencia mecánica de contracción.

$$\dot{M}[W] = \dot{W}[W] + \dot{Q}[W] \quad (2)$$

La potencia mecánica necesaria para mover un fluido a una velocidad y durante un periodo de tiempo, es la que define el trabajo mecánico realizado por el corazón para bombear la sangre. Relacionando el caudal de sangre con el salto de presiones que se produce en el sistema.

$$\dot{W}[W] = \dot{V}[m^3/s] \times 1000[Pa/kPa] \times \Delta P[kPa] \quad (3)$$

El caudal de sangre que atraviesa un punto dado de la circulación en un periodo determinado de tiempo es lo que se conoce como flujo sanguíneo y coincide con el gasto cardíaco al ser este la cantidad de sangre que bombea el corazón en la aorta en cada minuto. Cuyo valor medio según [7] para una persona adulta y en reposo es:

$$\dot{V}[m^3/s] = 5000[ml/min] \times \frac{1}{10^6} \left[\frac{m^3}{ml} \right] \times \frac{1}{60} \left[\frac{min}{s} \right] \quad (4)$$

El salto de presiones que se produce en el corazón viene dado por la diferencia entre la presión del sistema de referencia y la media entre la presión sistólica y diastólica. Se toma el valor medio porque el bombeo cardíaco es pulsátil. Se tiene que tener en cuenta que la presión arterial es relativa a la atmosférica. Los datos necesarios para resolver esta ecuación se encuentran en el *anexo E*.

$$\Delta P[kPa] = p - p_o \quad (5)$$

El consumo de oxígeno del corazón y la energía química invertida durante la contracción están relacionados directamente con el trabajo externo y la energía potencial (trabajo adicional que tendría que hacer el ventrículo si tuviese que vaciarse por completo) que se representan en la *Figura 6*. (sección 1) como la zona sombreada [9].

Puesto que más del 95 % de la energía consumida por el organismo proviene de reacciones oxidativas con distintos alimentos [14], se puede calcular la energía química metabólica del miocardio, con mucha precisión, a partir del consumo de oxígeno. Conociendo la calorimetría indirecta del oxígeno, es decir, que si se metaboliza un litro de oxígeno con los ácidos grasos se liberan 4,7 [kcal] según [17], y el oxígeno consumido por el miocardio, se puede hallar la energía metabólica.

$$\dot{M}[W] = \dot{V}_{corazon}(O_2)[Nml/s] \times PCS(O_2)[kJ/l] \quad (6)$$

El caudal consumido por el miocardio es un dato experimental. El artículo [18] recoge los datos experimentales del oxígeno consumido por el miocardio de un número de individuos adultos, sanos y en reposo. Teniendo en cuenta que el valor medio de peso del corazón de una persona adulta es de 300 [g] según [19].

$$\dot{V}_{corazon}(O_2)[Nml/s] = \frac{7 + 8,2}{2} \left[\frac{Nml}{100g \times min} \right] \times \frac{m_{corazón}}{100} [g] \times \frac{1}{60} \left[\frac{min}{s} \right] \quad (7)$$

La calorimetría indirecta o el equivalente energético del oxígeno como se ha indicado antes equivale a la energía liberada al metabolizar un litro de oxígeno con los ácidos grasos [17], principal fuente energética para las células cardíacas.

$$PCS(O_2) = 4,7[kcal] \times 4,18[kJ/kcal] \quad (8)$$

- *Conclusiones del balance energético*

Una forma de validar los cálculos realizados es comparar la eficiencia máxima, con los valores recogidos en la bibliografía. Según [7] la eficiencia máxima del corazón de una persona adulta sana y en reposo esta entre el 20 y el 25 %.

El consumo de oxígeno es proporcional a la tensión del músculo cardíaco durante la contracción por el periodo de tiempo que dura. De este modo, como la tensión es alta cuando lo es la presión sistólica y se consume mayor cantidad de oxígeno, la eficiencia máxima es la que se produce a presión sistólica máxima. Además, se gasta mucha más energía química a dicha presión, según [7]. El valor medio de la presión sistólica máxima es proporcionado por [20] y es de $p_{max} = 140[mmHg]$.

La eficiencia máxima a dicha presión sistólica según el modelado realizado es de 21 %, como se puede ver en el *anexo G* de resultados. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo realizado es válido, al encontrarse la eficiencia máxima calculada dentro del rango indicado por la bibliografía.

Existe otro dato de la bibliografía que valida el modelo. En el artículo [4] se estudia el balance exergético del corazón comparando individuos sanos con hipertensos y la influencia de diferentes niveles de actividad física en ambos grupos (cada punto que forma la función es un nivel diferente de esfuerzo, en reposo, andando y corriendo). Según el *Gráfico 1* de [4], que compara el trabajo del corazón (\dot{W}_{heart}) en ambos grupos de individuos, bajo diferentes niveles de trabajo (\dot{W}_{body}), el trabajo del corazón en reposo ($\dot{W}_{body} = 0$) toma valores un poco superiores a 1[W] al igual que el trabajo obtenido en el modelo ($\dot{W} = 1,111[W]$). Se debe tomar el valor de la recta negra, que es la perteneciente al corazón izquierdo de un individuo sano.

El corazón izquierdo es el que adquiere mayores valores por trabajar a más altas presiones [9]. El derecho realiza un trabajo prácticamente despreciable.

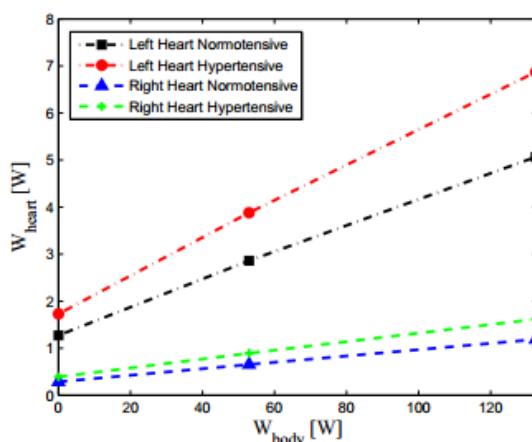


Gráfico 1. Potencia de bombeo del corazón como función de la intensidad de ejercicio [4].

3.2. Flujos de sangre en el corazón

Se va a analizar la composición de los flujos de sangre del corazón. Más en concreto de los que atraviesan la coronaria para alimentar las células miocárdicas, como se puede observar en el esquema de la *Figura 8*.

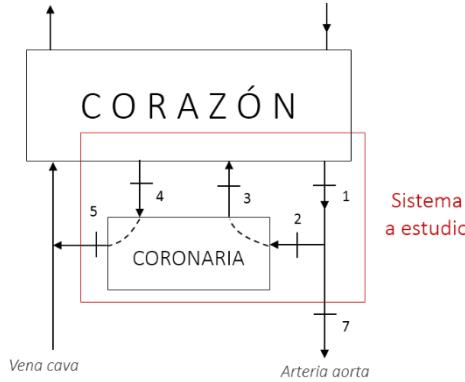


Figura 8. Esquema de los flujos a estudio.

La zona roja delimita los flujos a estudio, es decir, los que intervienen en el suministro de nutrientes al miocardio para que sus células puedan realizar el metabolismo celular y así producir energía química.

Se denomina flujo 1, al caudal de sangre que sale del corazón izquierdo por la arteria aorta. Es decir, el gasto cardíaco, ya que, como se ha dicho con anterioridad, es la cantidad de sangre que bombea el corazón en la aorta cada minuto.

$$\dot{V}_1[\text{ml/s}] = \dot{V}[\text{m}^3/\text{s}] \times 10^6[\text{ml/m}^3] \quad (9)$$

El flujo 2 es el 5 % ($ptg_{coronaria} = 0,05$) [11] del caudal total que sale del corazón derecho y que es dirigido a la coronaria, para que esta lo suministre a las células miocárdicas y puedan producir energía para la contracción. Los caudales de los compuestos que forman el flujo 2, también mantiene esta relación como se puede observar en las siguientes ecuaciones.

$$\dot{V}_2[\text{ml/s}] = \dot{V}_1[\text{ml/s}] \times ptg_{coronaria} \quad (10)$$

$$\dot{V}_2(O_2)[\text{Nml/s}] = \dot{V}_1(O_2)[\text{Nml/s}] \times ptg_{coronaria} \quad (11)$$

$$\dot{V}_2(glu)[\text{ml/s}] = \dot{V}_1(glu)[\text{ml/s}] \times ptg_{coronaria} \quad (12)$$

$$\dot{V}_2(as)[\text{ml/s}] = \dot{V}_1(as)[\text{ml/s}] \times ptg_{coronaria} \quad (13)$$

$$\dot{V}_2(otros)[\text{ml/s}] = \dot{V}_1(otros)[\text{ml/s}] \times ptg_{coronaria} \quad (14)$$

Los flujos 1 y 2, pertenecen a la circulación arterial, por lo tanto, se encargan de suministrar nutrientes, a los tejidos periféricos. Es por ello por lo que serán ricos en oxígeno, glucosa y ácido

esteárico, así como de numerosas células y compuestos disueltos en el plasma, que no son de interés para este estudio.

$$\dot{V}_1[\text{ml/s}] = \dot{V}_1(O_2) + \dot{V}_1(\text{glu}) + \dot{V}_1(\text{as}) + \dot{V}_1(\text{others}) \quad (15)$$

$$\dot{V}_2[\text{ml/s}] = \dot{V}_2(O_2) + \dot{V}_2(\text{glu}) + \dot{V}_2(\text{as}) + \dot{V}_2(\text{others}) \quad (16)$$

Los flujos 3 y 2 son el mismo, al ser la coronaria una arteria que únicamente transporta la sangre. Lo mismo ocurre con los flujos 4 y 5 que son los que transportan los compuestos de deshecho del metabolismo de las células miocárdicas.

El flujo 4, al contrario que los anteriores, pertenece al retorno venoso, por lo que transporta elementos de deshecho metabólicos (dióxido de carbono y agua), y el resto de compuestos que no son de interés en el estudio.

$$\dot{V}_4[\text{ml/s}] = \dot{V}_4(CO_2) + \dot{V}_4(H_2O) + \dot{V}_4(\text{others}) \quad (17)$$

Se va a suponer para el modelo, que todo el oxígeno que llega al miocardio es consumido por sus células. En realidad, la sangre del retorno venoso a pesar de ser pobre en oxígeno tiene pequeñas cantidades del mismo. Al ser el aporte de desechos de la coronaria tan pequeño en proporción con el resto de la sangre del retorno venoso, se puede despreciar su aporte de oxígeno, suponiendo que es nulo.

$$\dot{V}_2(O_2)[\text{Nml/s}] = \dot{V}_{\text{corazon}}(O_2)[\text{Nml/s}] \quad (18)$$

Existe una relación entre el oxígeno consumido y el dióxido de carbono producido en las reacciones oxidativas del metabolismo de las células, denominado cociente respiratorio. Este puede tener diferentes valores, que vienen determinados por los nutrientes que se metabolizan con el oxígeno. En el caso de las células miocárdicas, como se ha dicho con anterioridad, el metabolismo de las grasas produce el 70 % de la energía química metabólica, por ello, cuando se metabolizan con el oxígeno, se forman 70 moléculas de dióxido de carbono por cada 100 de oxígeno consumido [21].

$$RQ = \frac{\dot{V}_{\text{corazon}}(CO_2)[\text{Nml/s}]}{\dot{V}_{\text{corazon}}(O_2)[\text{Nml/s}]} = 0,7 \quad (19)$$

$$\dot{V}_4(CO_2)[\text{Nml/s}] = \dot{V}_{\text{corazon}}(CO_2)[\text{Nml/s}] \quad (20)$$

Sabiendo el caudal de oxígeno consumido y de dióxido de carbono producido, se puede conocer los caudales de glucosa y ácido esteárico consumidos, así como el agua producida.

$$\dot{m}_{O_2}[\text{kg/s}] = m_{O_2/\text{glu}} \times \dot{m}_{\text{glu}}[\text{kg/s}] + m_{O_2/\text{as}} \times \dot{m}_{\text{as}}[\text{kg/s}] \quad (21)$$

$$\dot{m}_{CO_2}[\text{kg/s}] = m_{CO_2/\text{glu}} \times \dot{m}_{\text{glu}}[\text{kg/s}] + m_{CO_2/\text{as}} \times \dot{m}_{\text{as}}[\text{kg/s}] \quad (22)$$

$$\dot{m}_{H_2O}[\text{kg/s}] = m_{H_2O/\text{glu}} \times \dot{m}_{\text{glu}}[\text{kg/s}] + m_{H_2O/\text{as}} \times \dot{m}_{\text{as}}[\text{kg/s}] \quad (23)$$

Para completar las ecuaciones anteriores, se necesita conocer los kilogramos consumidos de oxígeno o productos de dióxido de carbono y agua, por kilogramos de glucosa y ácido esteárico, partiendo de las reacciones oxidativas de los mismo. Así como las conversiones de caudales volumétricos a másicos para obtener $\dot{V}_2(glu)[ml/s]$, $\dot{V}_2(as)[ml/s]$ y $\dot{V}_4(H_2O)[ml/s]$. Todo ello se encuentra recogido en el *anexo E.1*.

Por último, el caudal del retorno venoso tiene que ser igual al del arterial y concluir con el cálculo de las composiciones de los flujos principales [8].

$$\dot{V}_4[ml/s] = \dot{V}_2[ml/s] \quad (24)$$

3.3. Balance exergético

El análisis del balance exergético de un organismo vivo, ha sido utilizado en numerosos estudios, como se indica en el artículo [4] y en la introducción, para entre otras cosas, poder predecir patologías y comportamientos bajo diferentes condiciones, desde un punto de vista termodinámico.

Este análisis sirve para evaluar la calidad de un proceso de conversión de energía, como sucede en el caso del corazón, donde tras una serie de reacciones oxidativas, la energía química obtenida se transforma en trabajo mecánico y en calor.

La finalidad de dicho análisis es el conocimiento de la exergía destruida en un volumen de control, el conjunto de corazón y coronaria, donde se produce las reacciones metabólicas y por tanto la energía y su transformación a trabajo.

El balance de exergía para un volumen de control, en este caso el corazón, proporciona el valor de la exergía destruida en el mismo [4]. Se supone que no se producen variaciones en las condiciones ambientales. Según el balance de exergía se puede expresar como la exergía destruida, que resulta ser la transferencia de exergía asociada a los flujos de calor y trabajo menos las variaciones de exergía que se producen en el volumen de control. Si el sistema no sufre un cambio de volumen, la transferencia de exergía asociada al trabajo, es igual al propio trabajo del sistema.

$$\dot{B}_d = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}_{in} b_{in} - \sum_{out} \dot{m}_{out} b_{out} \quad (25)$$

Conociendo tanto el calor como el trabajo y el estado muerto (sistema de referencia), la ecuación (25) se puede expresar de la siguiente manera. Es la que se utilizará para los cálculos posteriores.

$$\dot{B}_d[W] = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) Q[\dot{W}] - \dot{W}[W] + \dot{B}_{in}[W] - \dot{B}_{out}[W] \quad (26)$$

Las exergía específica de cada compuesto (glucosa, ácido esteárico, oxígeno, dióxido de carbono y agua) que participan en las reacciones metabólicas tienen, en general, las tres componentes principales expresadas en la ecuación (27): química, física y de disolución. Los

datos necesarios para calcular cada componente de las exergías de los compuestos se encuentran recogidos en el anexo E.2.

$$b \left[\frac{kJ}{kg} \right] = bq \left[\frac{kJ}{kg} \right] + bf \left[\frac{kJ}{kg} \right] + bs \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (27)$$

De esta manera, los flujos de exergía de entrada y salida del volumen de control, quedarían de la siguiente manera, teniendo en cuenta que a la entrada la glucosa y el ácido esteárico consumen oxígeno, mientras que, a la salida, producen dióxido de carbono y agua, oxidándose por completo.

$$\begin{aligned} \dot{B}_{in}[W] = & \left[\left(\dot{m}_{glu} \left[\frac{kg}{s} \right] \times b_{glu} \left[\frac{kJ}{kg} \right] + \dot{m}_{glu} \left[\frac{kg}{s} \right] \times m_{O2/glu} \times b_{O2} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) \right. \\ & \left. + \left(\dot{m}_{as} \left[\frac{kg}{s} \right] \times b_{as} \left[\frac{kJ}{kg} \right] + \dot{m}_{as} \left[\frac{kg}{s} \right] \times m_{O2/as} \times b_{O2} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) \right] \times 10^3 \left[\frac{J}{kJ} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{out}[W] = & \left[\left(\dot{m}_{glu} \left[\frac{kg}{s} \right] \times m_{CO2/glu} \times b_{glu} \left[\frac{kJ}{kg} \right] + \dot{m}_{glu} \left[\frac{kg}{s} \right] \times m_{H2O/glu} \times b_{O2} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) \right. \\ & \left. + \left(\dot{m}_{as} \left[\frac{kg}{s} \right] \times m_{CO2/as} \times b_{as} \left[\frac{kJ}{kg} \right] + \dot{m}_{as} \left[\frac{kg}{s} \right] \times m_{H2O/as} \times b_{O2} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) \right] \\ & \times 10^3 \left[\frac{J}{kJ} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

Todos los compuestos que intervienen en el metabolismo celular del miocardio, por sufrir transformaciones en las reacciones celulares del ciclo de Krebs, definen una exergía metabólica, determinada por las exergías químicas de los productos (dióxido de carbono y agua) y los reactivos (oxígeno, glucosa y ácido esteárico).

$$b_q = \Delta h_f^0 - T_o \times s_o \quad (30)$$

Estos compuestos sufren a su vez cambios de presión y temperatura con el sistema de referencia, de este modo, presentan una exergía física. Esta se ve condicionada a la naturaleza de la sustancia, si esta es incompresible (agua, glucosa y el ácido esteárico), o se comporta como un gas ideal (oxígeno y dióxido de carbono).

$$b_f = \Delta h - T_o \times \Delta s \quad (31)$$

Sustancia incompresible

$$\Delta h = h - h_o = c_p \times (T - T_o) - \frac{(p - p_o)}{\rho} \quad (32)$$

$$\Delta s = s - s_o = c_p \times \ln \frac{T}{T_o} \quad (33)$$

$$b_f = \left[c_p \times (T - T_o) - \frac{(p - p_o)}{\rho} \right] - T_o \times \left[c_p \times \ln \frac{T}{T_o} \right] \quad (34)$$

Gas ideal

$$\Delta h = h - h_o = c_p \times (T - T_o) \quad (35)$$

$$\Delta s = s - s_o = c_p \times \ln \frac{T}{T_o} - R \times \ln \frac{p}{p_o} \quad (36)$$

$$b_f = [c_p \times (T - T_o)] - T_o \times \left[c_p \times \ln \frac{T}{T_o} - R \times \ln \frac{p}{p_o} \right] \quad (37)$$

Así como todos los compuestos presentan exergía física y química, no todos tienen exergía de disolución. La glucosa, el oxígeno y el dióxido de carbono, se encuentran disueltos en el plasma sanguíneo, a diferencia del ácido esteárico (compuesto apolar). El oxígeno y el dióxido de carbono no se disuelven en el agua al ser gases apolares, pero se encuentran unidos a una proteína, la hemoglobina, que si se encuentra disuelta en el plasma. Por ello, los únicos compuestos con exergía de disolución son la glucosa, el oxígeno y el dióxido de carbono.

$$b_s = -T_o \times \Delta s \quad (38)$$

La variación de entropía debido a un cambio de la composición en una mezcla ideal viene definida por la siguiente ecuación.

$$\Delta s = R \left[\frac{kJ}{kmol K} \right] \times \frac{1}{M_{compuesto}} \left[\frac{kmol}{kg} \right] \times \times (x_{compuesto} \times \ln x_{compuesto} + (1 - x_{compuesto}) \times \ln(1 - x_{compuesto})) \quad (39)$$

- *Conclusiones del balance exergético*

Al igual que en el caso del balance de energía, el de exergía se puede validar con datos bibliográficos, en concreto del artículo [4].

Según el Gráfico 2 de [4] que representa la exergía destruida ($\dot{B}_{d,heart}$) por el corazón en una persona sana bajo diferentes condiciones de ejercicio físico (\dot{W}_{body}), la exergía destruida en reposo ($\dot{W}_{body} = 0$) adquiere valores entre 6 – 7 [W]. El valor obtenido por el modelo se encuentra en este rango, $\dot{B}_{d,heart} = 6,409$ [W].

En este caso, el gráfico si que muestra la exergía total, la del corazón izquierdo y derecho.

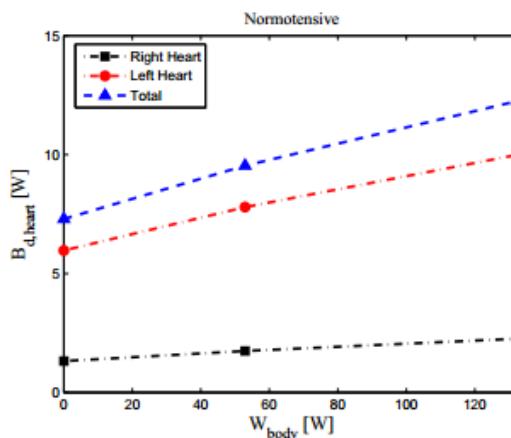


Gráfico 2. Exergía destruida por el corazón como función de la intensidad de ejercicio [4].

4. APPLICACIÓN DEL MODELO DEL CORAZÓN A PACIENTES CON HIPERTIROIDISMO.

Con el fin de demostrar la utilidad del modelo realizado, se aplica un caso práctico de una patología. Es decir, con los datos obtenidos de un estudio en pacientes con una patología determinada, se evalúan, mediante el modelo realizado, los efectos que tienen en el corazón, en cuanto a rendimiento, variaciones en los flujos y exergía destruida y su significado.

En concreto se van a estudiar los efectos del hipertiroidismo.

4.1. Hipertiroidismo

El hipertiroidismo es una enfermedad debida a una alteración hormonal de la glándula tiroides, una de las ocho glándulas endocrinas mayores que segregan las hormonas del organismo [22].

Las hormonas tiroideas inducen numerosos procesos en el cuerpo humano. En concreto, el exceso de hormonas que es la alteración que provoca la enfermedad del hipertiroidismo, tiene un efecto muy importante sobre el sistema cardiovascular, que desencadena en numerosas alteraciones que se ven con mayor detalle en el *anexo H*.

El efecto principal que produce el exceso de hormonas tiroideas es un aumento del metabolismo basal, es decir, el número y la actividad de las mitocondrias se incrementa, generando mayor energía metabólica. Para ello, las células precisan de un aporte de oxígeno mayor, así como de nutrientes que son digeridos con mayor rapidez. El flujo sanguíneo y el gasto cardíaco se ven incrementados en consecuencia. El corazón tiene que realizar un trabajo de contracción mayor para bombear mayores cantidades de sangre y suplir esta demanda [22].

En consecuencia, el metabolismo basal aumenta en un 60 y 100 % por encima de su valor normal [22].

4.2. Modelo numérico aplicado

Los efectos mencionados con anterioridad del exceso de las hormonas tiroideas sobre el sistema cardiovascular se pueden apreciar en el estudio realizado por [23] sobre cinco pacientes con hipertiroidismo, *Tabla 1*. Se comparan los valores de la *Tabla 2* [23] de personas con hipertiroidismo (valores de interés para el modelo de la *Tabla 1*, adaptados en unidades), con los mismos datos para personas sanas y en reposo (los que se han utilizado para el modelo en condiciones estándar) recogidas en la *Tabla 3*.

Tabla 1. Flujo coronario y consumo de oxígeno por el miocardio en cinco pacientes con hipertiroidismo [23].

Pt.	Age	Cardiac output (ml./min.)	Atrial coronary sinus O ₂ A-V difference (Vol. %)	O ₂ Coefficient of extraction (%)	Coronary blood flow (ml./100 Gm./min.)	Coronary blood flow per 100 Gm./min. (% of cardiac output (%)	Body O ₂ consumption (ml./min.)	Myocardial O ₂ consumption per 100 Gm./min. (% of total O ₂ consumption (%)	Myocardial O ₂ consumption per 100 Gm./min. (mm. Hg)	Mean arterial pressure (mm. Hg)	Coronary vascular resistance (mm. Hg/ml./100 Gm./min.)	Left ventricular work (Kg.M./min.)
M.M.	54	7300	9.7	62.0	154	2.1	246	14.9	6.1	115	0.75	11.8
J.J.	24	13600	8.6	64.8	168	1.2	331	14.4	4.3	90	0.53	16.7
J.B.	43	13820	7.0	59.3	157	1.1	238	11.0	4.6	80	0.51	15.0
L.R.	32	14930	10.2	60.7	117	0.78	397	11.9	3.0	76	0.65	13.6
M.H.	41	8870	7.9	68.1	180	2.3	228	14.2	6.2	98	0.54	11.8
Averages	38.8	11704	8.7	62.6	155	1.5	288	13.3	4.8	92	0.60	13.1

Tabla 2. Flujo coronario y consumo de oxígeno por el miocardio en pacientes con hipertiroidismo

Gasto cardiaco [ml/min]	Flujo coronario [ml/s]	Consumo oxígeno del miocardio [ml/s]	Presión arterial media [mmHg]	Trabajo ventricular derecho [W]
11704	7,750	0,665	92	2,143

Tabla 3. Flujo coronario y consumo de oxígeno por el miocardio en individuo sano y en reposo.

Gasto cardiaco [ml/min]	Flujo coronario [ml/s]	Consumo oxígeno del miocardio [ml/s]	Presión arterial media [mmHg]	Trabajo ventricular derecho [W]
5000	4,170	0,380	100	1,111

Para poder hacer la comparación entre los valores y ver los efectos de la enfermedad sobre el sistema cardiovascular, se han unificado las unidades, siguiendo las siguientes conversiones:

- Flujo coronario y consumo oxígeno por el miocardio:

$$\left[\frac{ml}{100g \times min} \right] \times \frac{m_{corazón}}{100} [g] \times \frac{1}{60} \left[\frac{min}{s} \right] = \left[\frac{ml}{s} \right] \quad (40)$$

- Trabajo ventricular derecho:

$$\left[\frac{kg \times m}{min} \right] \times 0,163444167 \left[\frac{min \times W}{s \times kg \times m} \right] = [W] \quad (41)$$

El flujo sanguíneo aumenta casi en un 50 % como indicaba la bibliografía. En consecuencia, el caudal de sangre que llega a la coronaria para regar el corazón es mucho mayor.

Como se indicaba con anterioridad, el flujo sanguíneo aumenta ante la mayor demanda de oxígeno debida a la aceleración de las reacciones metabólicas, por lo que el consumo de oxígeno se incrementa en un 60 % por encima de su valor normal.

La presión arterial se mantiene dentro de los límites normales de 80 – 120 [mmHg], sin grandes variaciones. Y por último el valor del trabajo también se ve aumentado, por lo que se puede deducir que, en estos pacientes, el exceso de hormonas tiroideas no es tan elevado como para producir el debilitamiento del músculo cardíaco (explicación más detallada sobre este fenómeno en el *anexo H*). Este valor de trabajo se podrá comparar con el obtenido en el modelo.

Los resultados obtenidos del modelo para este caso práctico se encuentran recogidos en el *anexo I*.

- *Conclusiones del modelo – Balance energético*

Como era de esperar, el rendimiento cardíaco de los individuos con hipertiroidismo es mucho más elevado, al tener que bombear mayor cantidad de sangre debido al aumento de las reacciones metabólicas. Esto también repercute en un aumento considerable del calor disipado, que provoca una aceleración del metabolismo de las células, en concreto de las epiteliales, ya que son el medio de disipación de dicho calor.

Si se aumentan las reacciones metabólicas, se producirá mayores cantidades de energía a consecuencia de un mayor consumo de oxígeno por el miocardio.

En la *Tabla 4* se puede ver como los valores metabólicos de energía, calor y consumo de oxígeno aumentan por encima de un 60 % de su valor normal, como se explicaba en la bibliografía.

Tabla 4. Comparación valores balance energético en condiciones estándar e hipertiroidismo.

	CONDICIÓN ESTÁNDAR	HIPERTIROIDISMO	Aumento respecto a las condiciones estándar
<i>Eficiencia</i>	14,880 [%]	18,310 [%]	23,051 [%]
\dot{M}	7,465 [W]	13,060 [W]	74,950 [%]
\dot{Q}	6,350 [W]	10,670 [W]	67,926 [%]
$\dot{V}_{corazon}(O_2)$	0,380 [ml/s]	0,665 [ml/s]	75,000 [%]

El trabajo que realiza el corazón, por todos los motivos nombrados anteriormente, también aumenta. A demás su valor coincide con el proporcionado por el artículo [23] como se ve en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Comparación valores del trabajo contracción en condiciones estándar, hipertiroidismo y valor referencia.

	CONDICIÓN ESTÁNDAR	HIPERTIROIDISMO	Aumento respecto a las condiciones estándar	Valor referencia hipertiroidismo [23]
\dot{W}	1,111 [W]	2,393 [W]	115,392 [%]	2,143 [W]

El trabajo que realiza el corazón de una persona con hipertiroidismo para bombear la sangre ($\dot{W}(\text{hipertiroidismo}) = 2,393 [W]$), se asemeja al que realiza una persona sana cuando está andando ($\dot{W}_{heart} = 2,4 [W]$). Se puede ver con mejor claridad en el *Gráfico 1* del artículo [4]. Resulta lógico ya que conforme se va aumentando la intensidad del trabajo físico realizado por el cuerpo, los músculos necesitan que les llegue mayores cantidades de sangre para que puedan realizar las funciones metabólicas y obtener energía que inviertan en dicho trabajo. Por lo que en ambas situaciones (individuo sano andando e individuo con hipertiroidismo) se produce un aumento del metabolismo basal respecto a los valores normales.

- *Conclusiones del modelo – Flujos de sangre del corazón*

Como ya se ha visto, el gasto cardíaco y el flujo de sangre en la coronaria son mayores en pacientes con hipertiroidismo que en individuos sanos. A pesar de ello, se puede ver que el porcentaje de sangre desviada hacia la coronaria es menor, en torno a 4 porciento. Esta disminución no es debida a la enfermedad, si no que el porcentaje de sangre que entra a la coronaria desde la arteria aorta puede variar entre 4 y 5 % [11].

Al ser el flujo de sangre del sistema circulatorio y el consumo de oxígeno del miocardio mucho mayor, también lo son los flujos de todos sus componentes.

- *Conclusiones del modelo – Balance exergético*

El hipertiroidismo no afecta a las reacciones metabólicas, únicamente aumenta el número de las mismas, provocando un aumento de los caudales de nutrientes metabolizados. Al necesitarse mayor potencia de bombeo, se incrementa notablemente la exergía metabólica, provocando que la exergía destruida por el corazón de un individuo con hipertiroidismo aumente en más de un 60 % respecto su valor normal, como se puede apreciar en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Comparación valores exergía destruida en condiciones estándar e hipertiroidismo.

	CONDICIÓN ESTÁNDAR	HIPERTIROIDISMO	Aumento respecto a las condiciones estándar
\dot{B}_d	6,409 [W]	10,750 [W]	67,733 [%]

Al igual que en el caso del trabajo del corazón, la exergía destruida se asemeja a la que realiza un individuo en un nivel de ejercicio físico alto, según el *Gráfico 2* del artículo [4], por las mismas razones que en el caso anterior, por el aumento del metabolismo basal. Esto se puede apreciar ya que la exergía destruida por el corazón de un individuo con hipertiroidismo ($\dot{B}_d(\text{hipertiroidismo}) = 10,750[\text{W}]$), está dentro de los límites de la exergía que presenta una persona andando o corriendo ($\dot{B}_{d,heart} \in (9 - 12)[\text{W}]$).

5. CONCLUSIONES

El trabajo de este documento se basa en la realización de un modelado que simula el comportamiento de un órgano vivo, en concreto el corazón. Dicho modelo se lleva a cabo aplicando las leyes de la termodinámica al músculo cardiaco, el cual se puede asemejar a una bomba pulsátil e involuntaria.

Antes de comenzar con el modelo, se realizó una profunda revisión bibliográfica, con el fin de entender la anatomía y comportamiento del corazón. También fue necesario entender su función en el cuerpo humano y como afecta al resto de órganos. Para ello se estudió el sistema cardiovascular en su totalidad.

El modelo de simulación del corazón se basa en el proceso por el cual el corazón produce una energía y la convierte en trabajo de contracción para bombear la sangre de forma involuntaria, es por lo que también se necesitó conocer el proceso por el cual producía dicha energía.

Con todos los conocimientos médicos adquiridos, se ha procedido a realizar el modelo numérico. Se ha obtenido el balance de energía y de exergía del corazón, así como los flujos de entrada y salida de la arteria coronaria. Este modelo sirve para conocer el rendimiento cardiaco, el trabajo de contracción producido, el oxígeno consumido, la exergía destruida por el corazón etc. Todo ello importantísimo para dar una idea de los efectos que, diferentes patologías (no solo de origen cardiaco) tienen sobre el corazón.

Antes de realizar la aplicación del modelo sobre un caso práctico, se ha dado validez al mismo, mediante los datos bibliográficos obtenidos de [4] y [7].

El caso práctico se realizó aplicando las condiciones de contorno de pacientes con hipertiroidismo del estudio [22]. Los datos relevantes que se introducen en el modelo se encuentran en la *Tabla 2*.

Comparando los valores obtenidos del modelo para ambos grupos de individuos, sanos y con hipertiroidismo, se ha llegado a la conclusión de que los efectos que tiene el exceso de hormonas tiroideas en el metabolismo celular afectan en gran medida al corazón, a pesar de no tratarse de una enfermedad cardiaca.

El hipertiroidismo provoca un aumento del metabolismo basal, por lo que las células precisan de un aporte de oxígeno mayor, así como de nutrientes que son digeridos con mayor rapidez. El flujo sanguíneo y el gasto cardiaco se ven incrementados en consecuencia.

Todos estos efectos se traducen en los parámetros obtenidos del modelo. El corazón destruye mayores cantidades de exergía en los individuos con hipertiroidismo, llegando a valores similares a los del corazón de un individuo sano cuando está realizando altos niveles de ejercicio físico.

Al bombear mayores cantidades de flujo sanguíneo el corazón debe trabajar más rápido, con una eficiencia cardiaca mayor, debido a un aumento del trabajo de bombeo del corazón. Finalmente, esto deriva en una disipación mayor de calor que acelera las reacciones metabólicas de las células epiteliales.

Como se ha podido observar con el caso de pacientes con hipertiroidismo, este trabajo ayuda a entender los efectos que pueden llegar a tener algunas patologías sobre el corazón. Estas pueden no ser de carácter cardiovascular, pero afectar al mismo, como es el caso expuesto con anterioridad.

Diariamente se realizan pruebas de esfuerzo a pacientes que acaban de sufrir cardiopatías isquémicas. Un modelo como el expuesto en este trabajo, puede ayudar a determinar la

gravedad de la cardiopatía, así como la evolución de la misma sobre el paciente, los riesgos que puede tener al llevar una vida normalizada o la tendencia del mismo a recuperar una vida en plenas facultades o limitada en cuanto a esfuerzo físico.

El modelo propuesto en este trabajo sirve como base para numerosas aplicaciones futuras ya que se pueden evaluar los efectos que diferentes patologías tienen sobre el corazón y su futura evolución sobre el mismo. A corto plazo se plantean posibles líneas futuras de continuación del trabajo de este documento:

- *Influencia del ejercicio físico en personas con hipertiroidismo.*

Existen numerosos artículos en los que se expone, no solo la influencia de diferentes niveles de ejercicio sobre un individuo sano, si no la comparación con individuos enfermos.

En el caso del hipertiroidismo se podría continuar el estudio, analizando una situación similar. A demás, esto adquiere gran relevancia al producir esta enfermedad sobre el corazón, los mismos efectos que un estado de ejercicio físico permanente.

Se podría plantear el análisis de la influencia del ejercicio físico sobre pacientes enfermos y su comparación con individuos sanos.

Con este estudio se vería si la tendencia de la exergía destruida, así como la del trabajo de contracción del corazón va en aumento o se produce algún límite en cuanto al rendimiento o energía metabólica que puede producir el corazón.

- *Comparación hipertiroidismo con hipotiroidismo*

El hipotiroidismo es otra enfermedad de la glándula tiroideas que aparece cuando se produce un déficit de hormonas tiroideas. Al contrario que en el caso del hipertiroidismo, el metabolismo basal tiende a disminuir hasta en un 40 % de su valor normal [22].

Analizar los efectos que puede tener esta enfermedad y poder compararla con el análisis realizado en este trabajo sobre el hipertiroidismo podría resultar de gran interés. A demás, se tendría un mayor conocimiento de la influencia de las hormonas tiroideas sobre el sistema cardiovascular. El estudio de las hormonas tiroideas resulta de gran interés, como se ha comentado anteriormente, porque indican de forma indirecta sobre el corazón y afectan a numerosos procesos y organismos del cuerpo humano.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Escudero Rodríguez, B., Sánchez Segura, J.M., Borrás Pérez, F.X. *Estructura y función del cuerpo humano. Capítulo 11: Metabolismo.* 2^a ed. McGraw-hill España; 2002.
- [2] Harold J. Morowitz. *Energy flow in biology.* Yale university, New Haven, Connecticut 1968.
- [3] Batato M, Borel L, Deriaz O, Jequier E. *Analyse exergétique théorique et expérimentale du corps humain.* Entropie 1990;26(153-154):120-30
- [4] Henriques IB, et al., *Exergy model of the human heart,* Energy. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.150>
- [5] Mady CEK, Albuquerque Neto C, Fernandes TL, Hernandez AJ, Saldiva PHN, Yanagihara JI, et al. *Exergy performande of human body under physical activities.* Energy 2014;62:370-8
- [6] Dr. Pereira S., Dr. Aguilera O., Dr. Sagás R., Dr. Polledo U. *Influencia del ejercicio físico sobre algunos factores de riesgo de la cardiopatía isquémica.* Invest Biomed 1998; 17(3):214-21
- [7] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 14: Visión general de la circulación; biofísica de la presión, el flujo y la resistencia.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [8] Escudero Rodríguez, B., Sánchez Segura, J.M., Borrás Pérez, F.X. *Estructura y función del cuerpo humano. Capítulo 15: Aparato cardiovascular.* 2^a ed. McGraw-hill España; 2002.
- [9] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 9: Músculo cardiaco, el corazón como bomba y la función de las válvulas cardíacas.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [10] Paul Knapen, MD, PhD. *Myocardial energetics and efficiency. Current status of the noninvasive approach.* Circulation. 2007;115:918-927.
- [11] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 21: Flujo sanguíneo muscular y gasto cardíaco durante el ejercicio; la circulación coronaria y la cardiopatía isquémica.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [12] Escudero Rodríguez, B., Sánchez Segura, J.M., Borrás Pérez, F.X. *Estructura y función del cuerpo humano. Capítulo 16: La sangre.* 2^a ed. McGraw-hill España; 2002.
- [13] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 2: Las células y sus funciones* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [14] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 67: Metabolismo de los hidratos de carbono y formación del trifosfato de adenosina.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [15] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 68: Metabolismo de los lípidos.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [16] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 69: Metabolismo de las proteínas.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [17] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 72: Energética y metabolismo.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [18] Sun, Yeatman et al. *Tracer kinetic model for 1-Carbon-11 acetate.* 1998. 275.
- [19] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 23: Válvulas y tonos cardíacos; cardiopatías valvulares y congénitas.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [20] Fundación española del corazón: "Hipertensión y riesgo cardiovascular". Disponible en: <http://www.fundaciondelcorazon.com/prevencion/riesgo-cardiovascular/hipertension-tension-alta.html>
- [21] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 71: Equilibrio energético: regulación prandial; obesidad y ayuno; vitaminas y minerales.* 12^a ed. Elsevier; 2011.

- [22] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 76: Hormonas metabólicas tiroideas.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [23] M.D. Leight L., M.D. DeFazio V., M.D. Talmers F. *Coronary blood Flow, myocardial oxygen consumption and myocardial metabolism in normal and hyperthyroid human subjects.* Circulation, Volume XIV. 1956
- [24] Guyton AC, Hall JE. *Tratado de fisiología médica. Capítulo 1: Organización funcional del cuerpo humano y control del “medio interno”.* 12^a ed. Elsevier; 2011.
- [25] Lide, David R. *CRC Handbook of chemistry and physics.* Boca Raton, Florida. 9^a ed. 2009. 978-1-4200-9084-0
- [26] Libro del Web de Química del NIST. Disponible en:
<http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=Stearic+acid&Units=SI>

ANEXO A. Índice de figuras, gráficos y tablas.

En este anexo se pueden encontrar todas las figuras, gráficos y tablas utilizadas a lo largo del trabajo.

A.1. Figuras

- *Figura 1.* Circulaciones principales del sistema cardiovascular y las redes de distribución sanguínea [7].
- *Figura 2.* Anatomía externa y relaciones anatómicas del corazón [8].
- *Figura 3.* Estructura del corazón y trayecto del flujo sanguíneo a través de las cavidades cardíacas y de las válvulas cardíacas [9].
- *Figura 4.* Potencial de acción correspondiente al músculo ventricular (izq.) y al músculo esquelético (drch.) [9].
- *Figura 5.* Acontecimientos del ciclo cardíaco para la función del ventrículo izquierdo [9].
- *Figura 6.* Relación entre el volumen ventricular izquierdo y la presión intraventricular durante un latido [9].
- *Figura 7.* Formación de energía metabólica en las células [13].
- *Figura 8.* Esquema de los flujos a estudio.
- *Figura D.1.* Trifosfato de adenosina [13].
- *Figura E.1.* Presiones sanguíneas normales en las distintas porciones del aparato circulatorio cuando una persona está en decúbito [7]

A.2. Gráficos

- *Gráfico 1.* Potencia de bombeo del corazón como función de la intensidad de ejercicio [4].
- *Gráfico 2.* Exergía destruida por el corazón como función de la intensidad de ejercicio [4].

A.3. Tablas

- *Tabla 1.* Flujo coronario y consumo de oxígeno por el miocardio en cinco pacientes con hipertiroidismo [23].
- *Tabla 2.* Flujo coronario y consumo de oxígeno por el miocardio en pacientes con hipertiroidismo.
- *Tabla 3.* Flujo coronario y consumo de oxígeno por el miocardio en individuo sano y en reposo.
- *Tabla 4.* Comparación valores balance energético en condiciones estándar e hipertiroidismo.
- *Tabla 5.* Comparación valores trabajo contracción en condiciones estándar, hipertiroidismo y valor referencia.
- *Tabla 6.* Comparación valores exergía destruida en condiciones estándar e hipertiroidismo.
- *Tabla E.1.* Datos de los compuestos. Ácido esteárico, glucosa y agua.
- *Tabla E.2.* Datos de los compuestos. Oxígeno y dióxido de carbono.
- *Tabla G.1.* Resultados del balance energético en condiciones normales.
- *Tabla G.2.* Resultados del balance energético en condiciones de máxima presión sistólica.
- *Tabla G.3.* Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida de la aorta.

- *Tabla G.4.* Resultados los flujos de sangre del corazón. Entrada coronaria.
- *Tabla G.5.* Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida coronaria.
- *Tabla G.6.* Datos necesarios. Caudales másicos.
- *Tabla G.7.* Datos necesarios.
- *Tabla G.8.* Exergía específica. Total.
- *Tabla G.9.* Exergía específica. Física.
- *Tabla G.10.* Exergía específica. Química.
- *Tabla G.11.* Exergía específica. Disolución.
- *Tabla G.12.* Exergía del corazón.
- *Tabla G.13.* Datos de los compuestos. Calor específico.
- *Tabla G.14.* Datos de los compuestos. Densidad.
- *Tabla G.15.* Datos de los compuestos. Entalpía de formación.
- *Tabla G.16.* Datos de los compuestos. Entropía estándar.
- *Tabla G.17.* Datos de los compuestos. Masa molar.
- *Tabla G.18.* Datos de los compuestos. Fracción molar.
- *Tabla I.1.* Resultados del balance energético pacientes con hipertiroidismo.
- *Tabla I.2.* Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida de la aorta. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.3.* Resultados los flujos de sangre del corazón. Entrada coronaria. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.4.* Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida coronaria. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.5.* Datos necesarios. Caudales másicos. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.6.* Datos necesarios. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.7.* Exergía específica. Total. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.8.* Exergía específica. Física. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.9.* Exergía específica. Química. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.10.* Exergía específica. Disolución. Hipertiroidismo.
- *Tabla I.11.* Exergía del corazón. Hipertiroidismo.

ANEXO B. Definiciones

En este anexo se pueden encontrar las definiciones marcadas con (*) a lo largo del trabajo.

- *Ácido úrico*. Compuesto químico que se crea cuando el cuerpo descompone sustancias llamadas purinas (sustancias que se encuentran en los alimentos y bebidas).
- *Alveolos*. Estructuras que forman racimos al final de los bronquiolos. En ellos se da el intercambio de gases entre el aire atmosférico y la sangre que circula por los capilares pulmones.
- *Cardiopatía isquémica*. Causa de muerte más frecuente causada por flujo sanguíneo coronario insuficiente. Causa la oclusión de la arteria coronaria, la fibrilación del corazón o el debilitamiento progresivo de la función de bomba del corazón.
- *Diástole*. Periodo de relajación del ciclo cardíaco.
- *Epífisis*. Cada uno de los extremos ensanchados de los huesos largos, situados a ambos lados de la parte larga central o diáfisis.
- *Hepático*. Del hígado o relacionado con él.
- *Hemostasia*. Proceso en el que desemboca la coagulación. La hemostasia es el cese de la pérdida de sangre desde un vaso dañado, seguida por su reparación.
- *Hiperplasia*. Aumento anormal de tamaño que sufre un órgano o un tejido orgánico debido al incremento del número de células normales que lo forman.
- *Homeostasis*. Los fisiólogos utilizan este término para referirse al mantenimiento de unas condiciones casi constantes del medio interno.
- *Médula ósea*. Tejido esponjoso que se encuentra en el interior de algunos de los huesos del cuerpo humano.
- *Nódulo sinusal*. Es una de las estructuras que compone el sistema de conducción del corazón. Es donde se origina el impulso eléctrico que da origen a un latido cardíaco. Se encuentra en la pared posterolateral superior de la aurícula derecha.
- *Potencial de acción*. Variación en el potencial que viaja a lo largo de la membrana celular. Se utiliza para llevar información entre unos tejidos y otros.
- *Seno coronario*. Conjunto de venas que se unen para formar un gran vaso que recoge la sangre de salida del miocardio.
- *Sístole*. Periodo de contracción del ciclo cardíaco.
- *Tejido hematopoyético*. Tejido responsable de la producción de células sanguíneas.
- *Tisulares*. Todo lo relacionado a los tejidos de un determinado órgano.
- *Urea*. Sustancia orgánica tóxica, resultante de la degradación de sustancias nitrogenadas en el organismo. Se expulsa a través de la orina y del sudor.
- *Víscera*. Órgano interno del cuerpo de personas o animales, contenido en la cavidad craneana, torácica o abdominal.

ANEXO C. Nomenclatura

En este anexo se pueden encontrar la nomenclatura utilizada a lo largo del trabajo.

<u>Nomenclatura</u>		
Δh	[kJ/kg]	Variación de entalpia
Δh_f^0	[kJ/kg]	Variación de entalpia de formación
$\Delta h_f^0(as)$	[kJ/kg]	Entalpia de formación del ácido esteárico
$\Delta h_f^0(CO_2)$	[kJ/kg]	Entalpia de formación del dióxido de carbono
$\Delta h_f^0(glu)$	[kJ/kg]	Entalpia de formación de la glucosa
$\Delta h_f^0(H_2O)$	[kJ/kg]	Entalpia de formación del agua líquida
$\Delta h_f^0(O_2)$	[kJ/kg]	Entalpia de formación del oxígeno
ΔP	[kPa]	Variación de presión
ΔP_{max}	[W]	Variación de presión máxima para presión sistólica máxima
Δs	[kJ/kgK]	Variación de entropía
\dot{B}_d	[W]	Exergía destruida
$\dot{B}_{d,heart}$	[W]	Exergía destruida del corazón según [4]
\dot{B}_{in}	[W]	Exergía de los compuestos de entrada al volumen de control
b_{in}	[kJ/kg]	Exergía específica de los compuestos de entrada al VC
\dot{B}_{out}	[W]	Exergía de los compuestos de salida del volumen de control
b_{out}	[kJ/kg]	Exergía específica de los compuestos de salida del VC
b_f	[kJ/kg]	Exergía física específica
b_q	[kJ/kg]	Exergía química específica
b_s	[kJ/kg]	Exergía de disolución específica
b_{as}	[kJ/kg]	Exergía específica del ácido esteárico
b_{co2}	[kJ/kg]	Exergía específica del dióxido de carbono
b_{glu}	[kJ/kg]	Exergía específica de la glucosa
b_{H2O}	[kJ/kg]	Exergía específica del agua
b_{O2}	[kJ/kg]	Exergía específica del oxígeno
cp	[kJ/kgK]	Calor específico

cp_{as}	[kJ/kgK]	Calor específico del ácido esteárico
cp_{CO_2}	[kJ/kgK]	Calor específico del dióxido de carbono
cp_{glu}	[kJ/kgK]	Calor específico de la glucosa
cp_{H_2O}	[kJ/kgK]	Calor específico del agua
cp_{O_2}	[kJ/kgK]	Calor específico del oxígeno
$Eficiencia$	[%]	Eficiencia cardiaca
$Eficiencia_{max}$	[%]	Eficiencia cardiaca del corazón máxima para presión sistólica máxima
\dot{M}	[W]	Energía química del metabolismo cardiaco
\dot{m}_{as}	[kg/s]	Caudal másico de ácido esteárico consumido por el miocardio
\dot{m}_{CO_2}	[kg/s]	Caudal másico de dióxido de carbono producido por el miocardio
\dot{m}_{glu}	[kg/s]	Caudal másico de glucosa consumido por el miocardio
\dot{m}_{H_2O}	[kg/s]	Caudal másico de agua producido por el miocardio
\dot{m}_{O_2}	[kg/s]	Caudal másico de oxígeno consumido por el miocardio
\dot{m}_{in}	[kg/s]	Caudal másico de entrada al volumen de control
\dot{m}_{out}	[kg/s]	Caudal másico de salida del volumen de control
$M_{compuesto}$	[kg/kmol]	Masa molar de un compuesto
M_{as}	[kg/kmol]	Masa molar del ácido esteárico
M_{CO_2}	[kg/kmol]	Masa molar del dióxido de carbono
M_{glu}	[kg/kmol]	Masa molar de la glucosa
M_{H_2O}	[kg/kmol]	Masa molar del agua
M_{O_2}	[kg/kmol]	Masa molar del oxígeno
$m_{CO_2/as}$	[kg/kg]	[kg] producidos de CO_2 , por [kg] de ácido esteárico consumidos
$m_{CO_2/glu}$	[kg/kg]	[kg] producidos de CO_2 , por [kg] de glucosa consumidos
$m_{H_2O/as}$	[kg/kg]	[kg] producidos de H_2O , por [kg] de ácido esteárico consumidos
$m_{H_2O/glu}$	[kg/kg]	[kg] producidos de H_2O , por [kg] de glucosa consumidos
$m_{O_2/as}$	[kg/kg]	[kg] consumidos de O_2 , por [kg] de ácido esteárico consumidos
$m_{O_2/glu}$	[kg/kg]	[kg] consumidos de O_2 , por [kg] de glucosa consumidos
$m_{corazón}$	[g]	Peso medio del corazón de una persona sana
p_o	[kPa]	Presión del sistema de referencia
p	[kPa]	Presión media sistólica-diastólica de la arteria aorta

p_{max}	[kPa]	Presión máxima sistólica de la arteria aorta
$PCS(O_2)$	[kJ/l]	Calorimetría indirecta del oxígeno
$ptg_{coronaria}$	[–]	Porcentaje de sangre que se desvía de la arteria aorta a la coronaria
\dot{Q}	[W]	Calor desprendido por el corazón
\dot{Q}_{max}	[W]	Calor desprendido corazón máximo para presión sistólica máxima
R	[kJ/kmolK]	Constante de los gases ideales
RQ	-	Cociente respiratorio del miocardio
ρ	[kg/m ³]	Densidad
ρ_{as}	[kg/m ³]	Densidad del ácido esteárico
ρ_{CO_2}	[kg/ml]	Densidad del ácido dióxido de carbono en condiciones normales
ρ_{glu}	[kg/m ³]	Densidad de la glucosa
ρ_{H_2O}	[kg/m ³]	Densidad del agua
ρ_{O_2}	[kg/ml]	Densidad del oxígeno de carbono en condiciones normales
s_o	[kJ/kgK]	Entropía estándar
$s_o(as)$	[kJ/kgK]	Entropía estándar del ácido esteárico
$s_o(CO_2)$	[kJ/kgK]	Entropía estándar del dióxido de carbono
$s_o(glu)$	[kJ/kgK]	Entropía estándar de la glucosa
$s_o(H_2O)$	[kJ/kgK]	Entropía estándar del agua líquida
$s_o(O_2)$	[kJ/kgK]	Entropía estándar del oxígeno
T_o	[°C]	Temperatura de referencia
T	[°C]	Temperatura media del cuerpo humano
\dot{V}	[m ³ /s]	Caudal volumétrico de sangre en un punto de la circulación
$\dot{V}_{corazón}(CO_2)$	[Nml/s]	Caudal volumétrico CO ₂ producido por el miocardio en C.N.
$\dot{V}_{corazón}(O_2)$	[Nml/s]	Caudal volumétrico O ₂ consumido en el miocardio en C.N.
V_{CN}	[kmol/m ³ N]	Volumen de un mol en condiciones normales (C.N.)
\dot{V}_1	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de salida por la arteria aorta
$\dot{V}_1(as)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de ácido esteárico del flujo 1
$\dot{V}_1(glu)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de glucosa del flujo 1
$\dot{V}_1(O_2)$	[N ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de oxígeno del flujo 1 en C.N.
$\dot{V}_1(otros)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo del resto de compuestos del flujo 1

\dot{V}_2	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de entrada a la coronaria
$\dot{V}_2(as)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de ácido esteárico del flujo 2
$\dot{V}_2(glu)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de glucosa del flujo 2
$\dot{V}_2(O_2)$	[N ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de oxígeno del flujo 2 en C.N.
$\dot{V}_2(otros)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo del resto de compuestos del flujo 2
\dot{V}_4	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de salida de la coronaria
$\dot{V}_4(CO_2)$	[Nml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de dióxido de carbono del flujo 4 en C.N.
$\dot{V}_4(H_2O)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo de agua del flujo 4
$\dot{V}_4(otros)$	[ml/s]	Caudal volumétrico sanguíneo del resto de compuestos del flujo 4
\dot{W}	[W]	Potencia mecánica de contracción cardiaca
\dot{W}_{body}	[W]	Potencia mecánica del cuerpo según [4]
\dot{W}_{heart}	[W]	Potencia mecánica del corazón según [4]
\dot{W}_{max}	[W]	Potencia mecánica del corazón máxima para presión sistólica máxima
x_{CO_2}	-	Fracción molar del dióxido de carbono
x_{glu}	-	Fracción molar de la glucosa
x_{O_2}	-	Fracción molar del oxígeno
$x_{compuesto}$	-	Fracción molar de un compuesto

ANEXO D. Metabolismo celular

Este anexo recoge de forma más detallada el metabolismo celular, el proceso por el cual se origina la energía química o metabólica necesaria para que las células realicen entre otras funciones, la contracción cardiaca.

En primer lugar, se explica de donde se origina dicha energía y por último, el proceso hasta la obtención de la misma.

D.1. Energía metabólica

La energía metabólica o química se libera para formar compuestos de alta energía denominados adenosín trifosfato (ATP). Son estos los que, además de utilizarse para dar energía a todas las reacciones metabólicas intercelulares, son empleados para producir la contracción muscular [14].

El ATP es la unidad biológica de energía libre en los seres vivos. Ejerce un papel esencial entre las vías metabólicas de producción de energía (catabolismo) y las de consumo de energía [1].

Se tratan de un nucleótido de adenina que contiene dos enlaces anhídrido fosfórico ricos en energía. Esto es debido al alto potencial de transferencia de estos grupos fosfato a causa de la fuerte repulsión de las cuatro cargas negativas que contiene, como se explica en [1]. La *Figura D.1* muestra la composición de estos compuestos altamente energéticos [13].

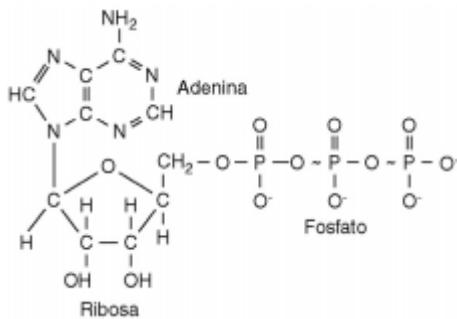


Figura D.1.. Trifosfato de adenosina [13].

Al producirse la hidrólisis de dichas uniones, se forma adenosina de difosfato eliminando las cargas negativas y con ello, parte de la repulsión electrostática [14]. Por lo que se produce gran cantidad de energía que se invierte entre otras funciones en:

- Biosíntesis de macromoléculas como el ADN o ARN a partir de sus precursores como nucleótidos o aminoácidos.
- Almacenamiento y expresión de la información genética
- Trabajo mecánico de contracción muscular y otros movimientos celulares.
- Transporte activo de iones y moléculas a través de las membranas.
- Mantenimiento de la temperatura corporal.

El enlace es muy lábil, por lo que puede dividirse fácilmente, liberando grandes cantidades de energía a demanda, siempre que se requiera para promover otras reacciones intracelulares. La separación de un radical produce la formación del difosfato de adenosina (ADP). La oxidación

de los nutrientes produce la formación de una nueva molécula que transforma los ADP de nuevo en ATP, iniciándose de nuevo el proceso [14].

D.2. Reacciones metabólicas. Proceso de oxidación de los nutrientes [11]

Una vez ingeridos los alimentos, son procesados por el aparato digestivo y transformados en sus respectivas subunidades básicas. Los nutrientes ricos en energía, hidratos de carbono, grasas y proteínas, son transformados en glúcidos, lípidos y aminoácidos respectivamente. Estos procesos de transformación requieren energía obtenida por el metabolismo celular del aparato digestivo.

Las subunidades son transportadas por la sangre a través de las arterias y sus ramificaciones hasta los capilares, donde se ponen en contacto con los tejidos para producir el intercambio de nutrientes y de oxígeno con las células.

En la mitocondria celular se produce la degradación de los nutrientes y su transformación a acetil coenzima A (acetil CoA). Estos procesos producen pequeñas cantidades de energía. En el caso de la glucosa, se necesita un proceso previo que tiene lugar en el citoplasma, el cual requiere un pequeño consumo de energía. Este proceso adicional se denomina glucólisis.

La oxidación completa del acetil CoA se desarrolla en la matriz mitocondrial siguiendo el ciclo de Krebs o ciclo del ácido cítrico, una secuencia cíclica de numerosas reacciones (el número de las mismas depende del nutriente metabolizado).

La energía contenida en los electrones y protones, liberada durante las reacciones oxidativas del ciclo, se convierte en ATP a través de la fosforilación oxidativa. En esta etapa es en la que se generan la mayor parte de ATP en los seres viso aerobios como el ser humano.

ANEXO E. Datos bibliográficos necesarios para la resolución del modelo numérico

Para los cálculos realizados en este trabajo, se comprenden dos sistemas, el de referencia y el que posee las características de presión y temperatura del volumen de control.

$$p_o = 101,325 \text{ [kPa]} \quad (E.1)$$

$$T_o = 25 \text{ [°C]} \quad (E.2)$$

El sistema en el que se encuentra el volumen de control estudiado se caracteriza por la presión de la arteria aorta. Al ser esta de carácter pulsátil entre la presión sistólica (120 [mmHg]) y diastólica (80 [mmHg]), como se puede ver en la *Figura E.1*. [7], se toma un valor medio. La temperatura se toma como la media del cuerpo humano, según [24].

$$p = 101,325[\text{kPa}] + 100[\text{mmHg}] \times 133.322[\text{Pa/mmHg}] \times \frac{1}{10^3} \left[\frac{\text{kPa}}{\text{Pa}} \right] \quad (E.3)$$

$$T = 37 \text{ [°C]} \quad (E.4)$$

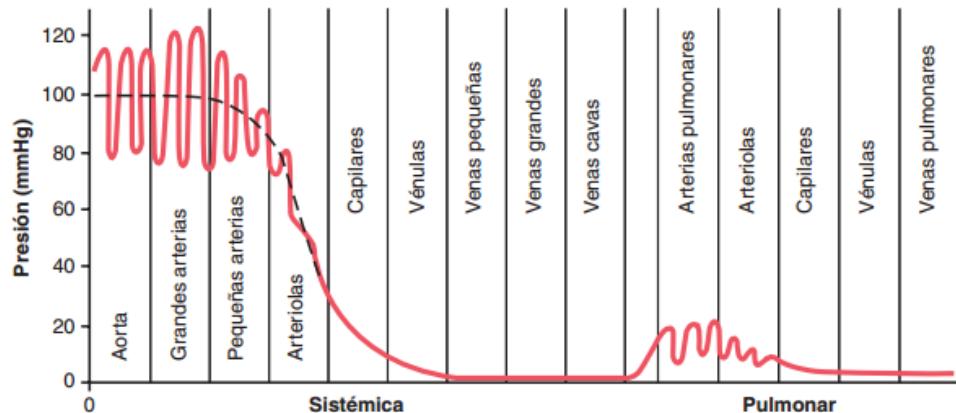
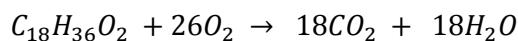
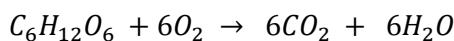


Figura E.1. Presiones sanguíneas normales en las distintas porciones del aparato circulatorio cuando una persona está en decúbito [7]

E.1. Flujos de sangre en el corazón

Para el cálculo de los caudales consumidos de glucosa y ácidos esteárico, así como el producto de agua por las células cardíacas (conociendo los de oxígeno consumido y dióxido de carbono producido), se necesita calcular las relaciones de consumo y producción, a partir de las reacciones oxidativas que tienen lugar en el metabolismo del miocardio.



$$m_{O_2/glu} = 6 \left[\frac{kmol O_2}{kmol glu} \right] \times \frac{M_{O_2}}{M_{glu}} \left[\frac{kmol \text{ glu} \times kg O_2}{kg \text{ glu} \times kmol O_2} \right] \quad (E.5)$$

$$m_{CO_2/glu} = 6 \left[\frac{kmol CO_2}{kmol glu} \right] \times \frac{M_{CO_2}}{M_{glu}} \left[\frac{kmol glu \times kg CO_2}{kg glu \times kmol CO_2} \right] \quad (E.6)$$

$$m_{H_2O/glu} = 6 \left[\frac{kmol H_2O}{kmol glu} \right] \times \frac{M_{H_2O}}{M_{glu}} \left[\frac{kmol glu \times kg H_2O}{kg glu \times kmol H_2O} \right] \quad (E.7)$$

$$m_{O_2/as} = 26 \left[\frac{kmol O_2}{kmol as} \right] \times \frac{M_{O_2}}{M_{as}} \left[\frac{kmol as \times kg O_2}{kg as \times kmol O_2} \right] \quad (E.8)$$

$$m_{CO_2/as} = 18 \left[\frac{kmol CO_2}{kmol as} \right] \times \frac{M_{CO_2}}{M_{as}} \left[\frac{kmol as \times kg CO_2}{kg as \times kmol CO_2} \right] \quad (E.9)$$

$$m_{H_2O/as} = 18 \left[\frac{kmol H_2O}{kmol as} \right] \times \frac{M_{H_2O}}{M_{as}} \left[\frac{kmol as \times kg H_2O}{kg as \times kmol H_2O} \right] \quad (E.10)$$

Por último, una vez calculados los caudales mísicos consumidos y producidos por el miocardio, se transforman en caudales volumétricos, para hacer la correspondencia con los flujos.

$$\dot{V}_2(glu) \left[\frac{ml}{s} \right] = \dot{m}_{glu} \left[\frac{kg}{s} \right] \times \frac{1}{\rho_{glu}} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \times 10^6 \left[\frac{ml}{m^3} \right] \quad (E.11)$$

$$\dot{V}_2(as) \left[\frac{ml}{s} \right] = \dot{m}_{as} \left[\frac{kg}{s} \right] \times \frac{1}{\rho_{as}} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \times 10^6 \left[\frac{ml}{m^3} \right] \quad (E.12)$$

$$\dot{V}_4(H_2O) \left[\frac{ml}{s} \right] = \dot{m}_{H_2O} \left[\frac{kg}{s} \right] \times \frac{1}{\rho_{H_2O}} \left[\frac{m^3}{kg} \right] \times 10^6 \left[\frac{ml}{m^3} \right] \quad (E.13)$$

E.2. Balance de exergía

Para calcular el balance exergético, se necesita conocer en primer lugar propiedades de los componentes que intervienen en las reacciones metabólicas.

El cálculo de las entalpías de formación a 25°C de cada compuesto, se realiza tomando la misma referencia en todos: la entalpía de formación de los elementos es igual a 0. Del mismo modo para la entropía estándar (25°C, 1 atm), donde la referencia se ha tomado con la entropía de formación del oxígeno ($s_o(O_2) = 49,003 [cal/mol^oC]$). Esta referencia se ha elegido porque es la que toman en el libro [2], de donde obtenemos la entalpía y la entropía de la glucosa.

Todos los datos relacionados con los compuestos se encuentran en la *Tabla E.1 y E.2*.

- *Ácido esteárico*. No se disuelve en el plasma al ser un compuesto apolar [12]. Proviene de la digestión de los lípidos.
- *Glucosa*. Se encuentra disuelta en el plasma, el cual está formado en un 91,5 por ciento por agua [12]. Dicha disolución es de aproximadamente 1 [g/l], tan baja que puede

considerarse que su densidad y su calor específico son iguales a la del agua. Proviene de la digestión de los hidratos de carbono.

- *Agua*. Además de ser el compuesto principal de la sangre, es uno de los productos de deshecho del metabolismo celular.
- *Dióxido de carbono y oxígeno*. Gases transportados en la proteína hemoglobina, que se encuentra diluida en el plasma. El dióxido de carbono proviene del desecho metabólico y el oxígeno del sistema respiratorio.

Tabla E.1. Datos de los compuestos. Ácido esteárico, glucosa y agua.

	ÁCIDO ESTEÁRICO	GLUCOSA	AGUA
<i>Estado físico en la sangre</i>	Sólido	Líquido	Líquido
<i>Fórmula química</i>	$C_{18}H_{36}O_2$	$C_6H_{12}O_6$	H_2O
<i>Masa molar</i>	284,5 [kg/kmol]	180,2 [kg/kmol]	18,02 [kg/kmol]
<i>Densidad</i>	0,9408 [g/cm ³] [25]	993,3 [kg/m ³] *	993,3 [kg/m ³] *
<i>Calor específico (T)</i>	501,55 [J/molK] [26]	4,183 [kJ/kgK] *	4,183 [kJ/kgK] *
<i>Entalpia de formación (T_o)</i>	-912 [kJ/mol] [26]	-304,26 [kcal/mol] [2]	-285,83 [kJ/mol] [26]
<i>Entropía estándar (T_o, p_o)</i>	435,6 [J/molK] [26]	50,7 [cal/molºC] [2]	69,95 [J/molK] [26]
<i>Fracción molar</i>	-	10^{-4}	-

Tabla E.2. Datos de los compuestos. Oxígeno y dióxido de carbono

	OXÍGENO	DIÓXIDO DE CARBONO
<i>Estado físico en la sangre</i>	Gas	Gas
<i>Fórmula química</i>	O_2	CO_2
<i>Masa molar</i>	32 [kg/kmol]	44,01 [kg/kmol]
<i>Densidad</i>	$M_{O_2} \times \frac{1}{22,4} \left[\frac{kmol}{m^3 N} \right] \times \frac{1}{10^6} \left[\frac{m^3}{ml} \right]$	$M_{CO_2} \times \frac{1}{22,4} \left[\frac{kmol}{m^3 N} \right] \times \frac{1}{10^6} \left[\frac{m^3}{ml} \right]$
<i>Calor específico (T)</i>	0,9169 [J/molK] *	0,8543 [kJ/kgK] *
<i>Entalpia de formación (T_o)</i>	0 [kJ/mol] [26]	-393,51 [kcal/mol] [26]
<i>Entropía estándar (T_o, p_o)</i>	205,152 [J/molK] [26]	213,79 [cal/molºC] [26]
<i>Fracción molar</i>	6×10^{-4}	6×10^{-4}

* Estos datos se obtienen de la herramienta de resolución de ecuaciones “EES”.

ANEXO F. Modelo numérico en el programa EES

File:17.08.2017 - Modelado numerico.EES
 29/08/2017 23:09:46 Page 1
 EES Ver. 10.139: #3470: For use only by students and faculty in the Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Zaragoza

{CALCULO FUNCIONAMIENTO MIOCARDIO EN REPOSO DE ADULTO SANO}

{1. Datos del sistema y de los compuestos}
 {Sistema de referencia}
 To=25
 {Temperatura de referencia [°C]}
 po=101,325
 {Presión de referencia [kPa]}
 {Sistema del modelo}
 T=37
 {Temperatura media del cuerpo humano [°C]}
 p=101,325+(100*133,322/1000)
 {Presión media de la aorta [kPa]}
 p_max=101,325+(140*133,322/1000)
 {Presión máxima sistólica de la aorta [kPa]}
 {Masas molares [g/mol]}
 MCO2 = Molarmass (CO2)
 {Dioxido de carbono: CO2 - producto}
 MO2 = Molarmass (O2)
 {Oxígeno: O2 - reactivo}
 MH2O = Molarmass (H2O)
 {Agua: H2O - producto}
 Mglu = 6 * molarmass (C) + 12 * molarmass (H) + 6 * molarmass (O)
 {Glucosa: C6H12O6 - reactivo}
 Mas = 18 * molarmass (C) + 36 * molarmass (H) + 2 * molarmass (O)
 {Ácido estearico: C18H36O2 - reactivo}
 {Datos de interés}
 gastocardiaco=5000
 {Gasto cardiaco en adulto en reposo [ml/min]}
 m_corazon=300
 {Masa normal del corazón [g]}
 ptg_coronaria=5
 {Porcentaje de sangre que fluye a la coronaria de la arteria aorta [%]}
 {Densidades de los compuestos}
 rho_H2O=density(Water, T=T; P=po)
 {Densidad del agua líquida [kg/m3]}
 rho_glu=rho_H2O
 {Densidad de la glucosa [kg/m3] aproximadamente la del agua al estar disuelta en esta en concentración muy baja}
 rho_as=940,8
 {Densidad del ácido estearico [kg/m3]}
 rho_O2=MO2/(V0#*1000000)
 {Densidad del oxígeno (gas) en condiciones normales [kg/ml]}
 rho_CO2=MCO2/(V0#*1000000)
 {Densidad del dióxido de carbono (gas) en condiciones normales [kg/ml]}
 {Calores específicos de los compuestos}
 cp_O2=cp(O2; T=T)
 {Calor específico del oxígeno [kJ/kgK]}
 cp_CO2=cp(CO2; T=T)
 {Calor específico del dióxido de carbono [kJ/kgK]}
 cp_H2O=cp(Water, T=T; P=po)
 {Calor específico del agua líquida [kJ/kgK]}
 cp_glu=cp_H2O
 {Calor específico de la glucosa [kJ/kgK]}
 cp_as=501,55/Mas
 {Calor específico del ácido estearico [kJ/kgK]}
 {Fracciones molares de los compuestos}
 x_O2=6e-4
 {Fracción molar del oxígeno disuelto en la sangre}
 x_CO2=6e-4
 {Fracción molar del dióxido de carbono disuelto en la sangre}
 x_glu=1e-4
 {Fracción molar de la glucosa disuelta en la sangre}

{2. Balance de energía del corazón}

File:17.08.2017 - Modelado numerico.EES
 EES Ver. 10.139: #3470: For use only by students and faculty in the Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Zaragoza

```

M_dot=W_dot+Q_dot
{Balance energético del corazón [W]}
Eficiencia=(W_dot/M_dot)*100
{Eficiencia energética del corazón [%]}
{Potencia mecánica producida por el corazón al contraerse}
W_dot=V_dot*DP*1000
{Potencia mecánica del corazón [W]}
V_dot=gastocardiaco/(60*1000000)
{Gasto cardiaco por minuto en un adulto en reposo [m3/s]}
DP=p-po
{Diferencia de presiones [kPa]}
{Energía metabólica}
M_dot=V_dot_O2*PCS_O2
{Energía desprendida en las reacciones químicas metabólicas [W]}
V_dot_O2=((7+8,2)/2)*(m_corazón/100)/60
{Consumo de oxígeno por el miocardio [Nm/s]}
PCS_O2=4,7*4,18
{Poder calorífico superior del oxígeno [kJ/NI]}

{3. Balance de exergía del corazón}
B_dot_d=B_dot_in-B_dot_out+Q_dot*(1-((To+273)/(T+273)))-W_dot
{Exergía destruida en el sistema corazón, coronaria [W]}
B_dot_in=((m_dot_glu*b_glu)+(m_dot_glu*m_O2_glu*b_O2))+((m_dot_as*b_as)+(m_dot_as*m_O2_as*b_O2))
)*1000 {Exergía de entrada al sistema [W]}
B_dot_out=((((m_dot_glu*m_CO2_glu*b_CO2)+(m_dot_glu*m_H2O_glu*b_H2O_l))+((m_dot_as*m_CO2_as*b_CO2)+(m_dot_as*m_H2O_as*b_H2O_l)))*1000 {Exergía de salida al sistema [W]}
{Exergia total de cada compuesto}
b_glu=bq_glu+bf_glu+bs_glu
{Exergia total de la glucosa física, química y de disolución [kJ/kg]}
b_as=bq_as+bf_as
{Exergia total del ácido esteárico física y química [kJ/kg]}
b_O2=bq_O2+bf_O2+bs_O2
{Exergia total del oxígeno física, química y de disolución [kJ/kg]}
b_CO2=bq_CO2+bf_CO2+bs_CO2
{Exergia total del dióxido de carbono física, química y de disolución [kJ/kg]}
b_H2O_l=bq_H2O_l+bf_H2O_l
{Exergia total del agua líquida física y química [kJ/kg]}
{Exergia química de los compuestos}
bq_glu=hf_glu-(To+273)*so_glu
{Exergia química de la glucosa [kJ/kg] como libre}
bq_as=hf_as-(To+273)*so_as
{Exergia química del ácido esteárico [kJ/kg] como libre}
bq_O2=hf_O2-(To+273)*so_O2
{Exergia química del oxígeno [kJ/kg] como libre}
bq_CO2=hf_CO2-(To+273)*so_CO2
{Exergia química del dióxido de carbono [kJ/kg] como libre}
bq_H2O_l=hf_H2O_l-(To+273)*so_H2O_l
{Exergia química del agua en estado líquido [kJ/kg] como libre}
{Exergia física de los compuestos}
bf_glu=cp_glu*((T+273)-(To+273)*(To+273)*ln((T+273)/(To+273)))-((p-po)/rho_glu)
{Exergia física de la glucosa (sustancia incompresible) [kJ/kg]}
bf_as=cp_as*((T+273)-(To+273)*(To+273)*ln((T+273)/(To+273)))-((p-po)/rho_as)
{Exergia física del ácido esteárico (sustancia incompresible) [kJ/kg]}
bf_H2O_l=cp_H2O*((T+273)-(To+273)*(To+273)*ln((T+273)/(To+273)))-((p-po)/rho_H2O)
{Exergia física del agua [kJ/kg]}
bf_O2=cp_O2*((T+273)-(To+273)*(To+273)*ln((T+273)/(To+273)))+(R#/MO2*(To+273)*ln(p(po)))
{Exergia física del oxígeno [kJ/kg]}
bf_CO2=cp_CO2*((T+273)-(To+273)*(To+273)*ln((T+273)/(To+273)))+(R#/MCO2*(To+273)*ln(p(po)))
{Exergia física del dióxido de carbono [kJ/kg]}
{Exergia de una disolución de los compuestos que se encuentran disueltos en la sangre}
bs_glu=-R#/Mglu*(To+273)*((x_glu*ln(x_glu))+((1-x_glu)*ln(1-x_glu)))
{Exergia de la glucosa por estar disuelta en el sangre [kJ/kg]}
bs_O2=-R#/MO2*(To+273)*((x_O2*ln(x_O2))+((1-x_O2)*ln(1-x_O2)))
{Exergia del oxígeno por estar disuelta en el sangre [kJ/kg]}
bs_CO2=-R#/MCO2*(To+273)*((x_CO2*ln(x_CO2))+((1-x_CO2)*ln(1-x_CO2)))
{Exergia del dióxido de carbono por estar disuelta en el sangre [kJ/kg]}

```

File:17.08.2017 - Modelado numerico.EES
 EES Ver. 10.139: #3470: For use only by students and faculty in the Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Zaragoza

```

{Entalpías de formación}
hf_glu=-304,26*4,18*1000/Mglu
{Entalpia de formación (To) de la glucosa [kJ/kg]}
hf_as=-912*1000/Mas
{Entalpia de formación (To) del acido estearico [kJ/kg]}
hf_O2=0
{Entalpia de formación (To) del oxígeno [kJ/kg]}
hf_CO2=-393,52*1000/MCO2
{Entalpia de formación (To) del dióxido de carbono [kJ/kg]}
hf_H2O_I=-285,84*1000/MH2O
{Entalpia de formación (To) del agua líquida [kJ/kg]}
{Entropia estandar}
so_glu=50,7*4,18/Mglu
{Entropia estandar (To,po) de la glucosa [kJ/kgK]}
so_as=435,6/Mas
{Entropia estandar (To,po) del acido estearico [kJ/kgK]}
so_O2=205,1/MO2
{Entropia estandar (To,po) del oxígeno [kJ/kgK]}
so_CO2=213,7/MCO2
{Entropia estandar (To,po) del dióxido de carbono [kJ/kgK]}
so_H2O_I=69,9/MH2O
{Entropia estandar (To,po) del agua líquida [kJ/kgK]}

```

4. Estudio de los flujos del sistema a estudio

{V1=flujo de salida del ventrículo izquierdo en dirección al sistema periférico, V1=Oxígeno + Glucosa + Ácido esteárico + Otros}

```

V_dot_1=gastocardiaco/60
{Caudal total V1=gasto cardiaco [ml/s]}
V_dot_1=V_dot_1_O2+V_dot_1_glu+V_dot_1_as+V_dot_1_otros
{Componentes principales del V1 [ml/s]}
{V2=flujo que alimenta al miocardio a través de la coronaria, V2=Oxígeno + Glucosa + Ácido esteárico + Otros}
V_dot_2=(ptg_coronaria/100)*V_dot_1
{Flujo de la coronaria es el 5% del total: V2=0,05*V1, [ml/s]}
V_dot_2_O2=V_dot_1_O2*(ptg_coronaria/100)
{Caudal de oxígeno del flujo de entrada a la coronaria [Nmol/s]}
V_dot_2_glu=V_dot_1_glu*(ptg_coronaria/100)
{Caudal de glucosa del flujo de entrada a la coronaria [ml/s]}
V_dot_2_otros=V_dot_1_otros*(ptg_coronaria/100)
{Caudal de otros del flujo de entrada a la coronaria [ml/s]}
V_dot_2=V_dot_2_O2+V_dot_2_glu+V_dot_2_as+V_dot_2_otros
{Componentes principales del V2 [ml/s]}
V_dot_2_O2=V_dot_O2
{Caudal de oxígeno de V2 [ml/s]}
{Reacciones oxidativas del metabolismo del miocardio}
{Calculo de los kg consumidos de O2 o producidos de CO2 y H2O por kg de glucosa y ácido estearico}
{reacciones oxidativas del metabolismo: C6H12O6 + 6*O2 --> 6*CO2 + 6*H2O ; C18H36O2 + 26*O2 --> 18*CO2 + 18*H2O}
m_O2_glu=6*MCO2/Mglu
{kg consumidos de oxígeno por kg de glucosa}
m_CO2_glu=6*MCO2/Mglu
{kg consumidos de dióxido de carbono por kg de glucosa}
m_H2O_glu=6*MH2O/Mglu
{kg consumidos de agua por kg de glucosa}
m_O2_as=26*MO2/Mas
{kg consumidos de oxígeno por kg de ácido esteárico}
m_CO2_as=18*MCO2/Mas
{kg consumidos de dióxido de carb. por kg de ácido esteárico}
m_H2O_as=18*MH2O/Mas
{kg consumidos de agua por kg de ácido esteárico}
{Cambio de los cuadales volumétricos conocidos a cuadales volumétricos}
m_dot_O2=V_dot_O2*rho_O2
{caudal máscico de oxígeno consumido por el miocardio [kg/s]}
m_dot_CO2=V_dot_CO2*rho_CO2
{caudal máscico de CO2 producido en el metabolismo [kg/s]}
{Ecuaciones de consumo y producción de desechos en las reacciones metabólicas}
m_dot_O2=m_O2_glu*m_dot_glu+m_O2_as*m_dot_as

```

File:17.08.2017 - Modelado numerico.EES
 29/08/2017 23:09:46 Page 4
 EES Ver. 10.139: #3470: For use only by students and faculty in the Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Zaragoza

```

{ecuación de consumo de oxígeno en el metabolismo [kg/s]}
  m_dot_CO2=m_CO2_glu*m_dot_glu+m_CO2_as*m_dot_as
{ecuación de producción de CO2 en el metabolismo [kg/s]}
  m_dot_H2O=m_H2O_glu*m_dot_glu+m_H2O_as*m_dot_as
{ecuación de producción de H2O en el metabolismo [kg/s]}
  {Cambio de los caudales básicos conocidos a caudales volumétricos}
  V_dot_2_glu=(m_dot_glu*1000000)/rho_glu
{caudal volumétrico glucosa consumido por el miocardio [ml/s]}
  V_dot_2_as=(m_dot_as*1000000)/rho_as
{caudal volumétrico ac.est. consumido por el miocardio [ml/s]}
  V_dot_4_H2O=(m_dot_H2O*1000000)/rho_H2O
{caudal volumétrico agua producido por el metabolismo [ml/s]}
  {V4=flujo de salida de la coronaria con los desechos de las reacciones metabólicas, V4=Oxígeno+dioxido de carbono+agua+otros}
  V_dot_4=V_dot_2
{Caudal del flujo 4 [ml/s]}
  RQ=0,7
{Coeficiente respiratorio}
  V_dot_CO2=V_dot_O2*RQ
{Caudal de CO2 producido por el metabolismo [Nm/s]}
  V_dot_4_CO2=V_dot_CO2
{Caudal de CO2 de V4 [Nm/s]}
  V_dot_4=V_dot_4_CO2+V_dot_4_H2O+V_dot_4_otros
{Componentes principales del V4 [ml/s]}

{5. Balance de energía del corazón para máxima eficiencia}
M_dot=W_dot_max+Q_dot_max
{Balance energético máximo del corazón [W]}
Eficiencia_max=(W_dot_max/M_dot)*100
{Eficiencia máxima energética del corazón [%]}
{Potencia mecánica máxima producida por el corazón al contraerse}
W_dot_max=V_dot*DP_max*1000
{Potencia mecánica máxima del corazón [W]}
DP_max=p_max-p0
{Diferencia de presiones máxima [kPa]}
  
```

ANEXO G. Resultados del modelo para condiciones estándar

Este anexo recoge los resultados de todos los análisis realizados en condiciones estándar (individuo adulto sano y en reposo). Se han obtenido con la herramienta de resolución de ecuaciones “EES”.

G.1. Balance de energía

Tabla G.1 y G.2. Resultados del balance energético en condiciones normales (izq. G.1.) y de máxima presión sistólica (derch. G.2.).

CONDICIONES ESTÁNDAR			A PRESIÓN SISTÓLICA MÁXIMA		
Eficiencia	14,88	[%]	Eficiencia_{max}	20,83	[%]
\dot{M}	7,465	[W]	\dot{M}	7,465	[W]
ΔP	13,33	[kPa]	ΔP_{max}	18,67	[kPa]
p_o	101,3	[kPa]	p_o	101,3	[kPa]
p	114,7	[kPa]	p_{max}	120	[kPa]
$PCS(O_2)$	19,65	[kJ/l]	$PCS(O_2)$	19,65	[kJ/l]
\dot{Q}	6,354	[W]	\dot{Q}_{max}	5,91	[W]
\dot{V}	$8,33 \times 10^{-5}$	[m ³ /s]	\dot{V}	$8,33 \times 10^{-5}$	[m ³ /s]
$\dot{V}_{corazon}(O_2)$	0,38	[ml/s]	$\dot{V}_{corazon}(O_2)$	0,38	[ml/s]
\dot{W}	1,111	[W]	\dot{W}_{max}	1,555	[W]

G.2. Flujos de sangre en el corazón

Tabla G.3 y G.4. Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida de la aorta (izq. G.3.) y entrada coronaria (derch. G.4.).

CAUDAL 1 – Salida aorta			CAUDAL 2 – Entrada coronaria		
\dot{V}_1	83,33	[ml/s]	\dot{V}_2	4,167	[ml/s]
$\dot{V}_1(as)$	$3,845 \times 10^{-3}$	[ml/s]	$\dot{V}_2(as)$	$1,922 \times 10^{-4}$	[ml/s]
$\dot{V}_1(glu)$	$2,562 \times 10^{-5}$	[ml/s]	$\dot{V}_2(glu)$	$1,281 \times 10^{-6}$	[ml/s]
$\dot{V}_1(O_2)$	7,6	[ml/s]	$\dot{V}_2(O_2)$	0,38	[ml/s]
$\dot{V}_1(otros)$	75,73	[ml/s]	$\dot{V}_2(otros)$	3,786	[ml/s]

Tabla G.5. Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida coronaria

CAUDAL 4 – Salida coronaria					
\dot{V}_4	4,167	[ml/s]	$\dot{V}_4(H_2O)$	$2,152 \times 10^{-4}$	[ml/s]
$\dot{V}_4(CO_2)$	0,266	[ml/s]	$\dot{V}_4(otros)$	3,9	[ml/s]

Tabla G.6. y G.7. Datos necesarios. Caudales másicos (izq. G.6.) y datos necesarios (derch. G.7.)

CAUDAL MÁSICO – <i>Consumo miocardio</i>			DATOS NECESARIOS		
\dot{m}_{as}	$1,809 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{CO2/as}$	2,785	[kg/kg]
\dot{m}_{CO2}	$5,223 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{CO2/glu}$	1,466	[kg/kg]
\dot{m}_{glu}	$1,273 \times 10^{-8}$	[kg/s]	$m_{H2O/as}$	1,14	[kg/kg]
\dot{m}_{H2O}	$2,138 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{H2O/glu}$	0,6	[kg/kg]
\dot{m}_{O2}	$5,425 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{O2/as}$	2,925	[kg/kg]
			$m_{O2/glu}$	1,066	[kg/kg]
			RQ	0,7	[–]
			$V_{corazon}(CO_2)$	0,266	[ml/s]

G.3. Balance de exergía**Tabla G.8. y G.9.** Exergía específicas. Total (izq. G.8.) y física (derch. G.9.)

EXERGÍA ESPECÍFICA - Total			EXERGÍA ESPECÍFICA - Física		
b_{as}	-3662	[kJ/kg]	$b_{f_{as}}$	0,4007	[kJ/kg]
b_{CO2}	-10381	[kJ/kg]	$b_{f_{CO2}}$	7,16	[kJ/kg]
b_{glu}	-7409	[kJ/kg]	$b_{f_{glu}}$	0,9708	[kJ/kg]
b_{H2O}	-17021	[kJ/kg]	$b_{f_{H2O}}$	0,9708	[kJ/kg]
b_{O2}	-1900	[kJ/kg]	$b_{f_{O2}}$	9,787	[kJ/kg]

Tabla G.10. y G.11. Exergía específicas. Química (izq. G.10.) y disolución (derch. G.11.)

EXERGÍA ESPECÍFICA - Química			EXERGÍA ESPECÍFICA - Disolución		
$b_{q_{as}}$	-3662	[kJ/kg]	$b_{s_{CO2}}$	0,2844	[kJ/kg]
$b_{q_{CO2}}$	-10389	[kJ/kg]	$b_{s_{glu}}$	0,01404	[kJ/kg]
$b_{q_{glu}}$	-7410	[kJ/kg]	$b_{s_{O2}}$	0,3911	[kJ/kg]
$b_{q_{H2O}}$	-17022	[kJ/kg]			
$b_{q_{O2}}$	-1910	[kJ/kg]			

Tabla G.12. Exergía del corazón.

EXERGÍA DEL CORAZÓN		
\dot{B}_{in}	-1,787	[W]
\dot{B}_{out}	-9,061	[W]
\dot{B}_d	6,409	[W]

G.4. Datos de los compuestos

Tabla G.13 y G.14. Datos de los compuestos. Calor específico (izq. G.13.) y densidad (derch. G.14.).

CALOR ESPECÍFICO			DENSIDAD		
cp_{as}	1,763	[kJ/kgK]	ρ_{as}	940,8	[kg/m ³]
cp_{CO_2}	0,8543	[kJ/kgK]	ρ_{CO_2}	$1,964 \times 10^{-6}$	[kg/ml]
cp_{glu}	4,183	[kJ/kgK]	ρ_{glu}	993,3	[kg/m ³]
cp_{H_2O}	4,183	[kJ/kgK]	ρ_{H_2O}	993,3	[kg/m ³]
cp_{O_2}	0,9169	[kJ/kgK]	ρ_{O_2}	$1,428 \times 10^{-6}$	[kg/ml]

Tabla G.15 y G.16. Datos de los compuestos. Entalpia formación (izq. G.15.) y entropía estándar (derch. G.16.).

ENTALPIA FORMACIÓN			ENTROPIA ESTANDAR		
$\Delta h_f^o(as)$	-3206	[kJ/kg]	$s_o(as)$	1,531	[kJ/kgK]
$\Delta h_f^o(CO_2)$	-8942	[kJ/kg]	$s_o(CO_2)$	4,856	[kJ/kgK]
$\Delta h_f^o(glu)$	-7059	[kJ/kg]	$s_o(glu)$	1,176	[kJ/kgK]
$\Delta h_f^o(H_2O)$	-15866	[kJ/kg]	$s_o(H_2O)$	3,88	[kJ/kgK]
$\Delta h_f^o(O_2)$	0	[kJ/kg]	$s_o(O_2)$	6,41	[kJ/kgK]

Tabla G.17 y G.18. Datos de los compuestos. Masa molar (izq. G.17.) y fracción molar (derch. G.18.).

MASA MOLAR			FRACCIÓN MOLAR		
M_{as}	284,5	[kg/kmol]	x_{CO_2}	6×10^{-4}	[−]
M_{CO_2}	44,01	[kg/kmol]	x_{glu}	1×10^{-4}	[−]
M_{glu}	180,2	[kg/kmol]	x_{O_2}	6×10^{-4}	[−]
M_{H_2O}	18,02	[kg/kmol]			
M_{O_2}	32	[kg/kmol]			

ANEXO H. Hipertiroidismo [22]

En la glándula tiroides, se secretan las hormonas tiroideas, en concreto la tiroxina y la triyodotironina. Está situada justo por debajo de la laringe, a ambos lados y por delante de la tráquea. Las hormonas que genera se transportan por la sangre unidas a las proteínas plasmáticas, en concreto a la globulina ligadora de la tiroxina que libera con lentitud las hormonas en los capilares cuando se encuentran en contacto con los tejidos efectores.

Las hormonas tiroideas inducen numerosos procesos en el cuerpo humano. Como en este trabajo se va a estudiar los efectos del hipertiroidismo en el corazón, vamos a explicar cada uno de esos procesos, bajo la premisa de un paciente con hipertiroidismo, es decir, con un exceso de hormonas tiroideas.

Las funciones fisiológicas de las hormonas tiroideas en un individuo con hipertiroidismo son:

- *Actividad metabólica*

Ante un exceso de hormonas, la tiroxina acelera las reacciones químicas en muchas células del organismo y, en consecuencia, aumenta la tasa metabólica entre un 60 y 100 por ciento por encima de su valor normal. La aceleración de las reacciones se debe a que las hormonas tiroideas incrementan el número y la actividad de las mitocondrias y por lo tanto la formación de ATP. Ante la escasez de hormonas, como ocurre en los pacientes con hipotiroidismo, el metabolismo disminuye en un 40 y 50 por ciento de su valor normal.

Se habla únicamente de la hormona tiroxina porque comprende el 93 por ciento de las hormonas con actividad metabólica secretadas de la glándula tiroides.

Este aumento de la actividad metabólica se traduce en una rápida captación de la glucosa, aumento de la glucólisis e incluso un aumento de la insulina, provocando al final menores niveles de glucosa en sangre. Este último efecto es peligroso, al ser la glucosa la fuente principal de energía de la mayoría de los órganos del cuerpo humano. Para el caso de los ácidos grasos sucede algo parecido al acelerarse su oxidación.

- *Crecimiento humano*

Al igual que en el caso del metabolismo, el crecimiento se acelera. Los niños con hipertiroidismo experimentan una velocidad de crecimiento elevada. Pero, esto provoca a su vez una maduración de los huesos más rápida y el cierre de la epífisis^(*) provocando una estatura final mucho menor.

Un efecto importante de la hormona consiste en el estímulo del crecimiento y del desarrollo del cerebro durante la vida fetal.

- *Vitaminas*

Las vitaminas suponen una parte esencial de algunas enzimas o coenzimas. Al incrementarse las reacciones metabólicas, también lo hacen las enzimas que ayudan a controlarlas y, por consiguiente, la demanda de vitaminas.

- *Peso corporal*

La demanda de mayor cantidad de nutrientes genera un aumento de consumo de alimentos (apetito) pero, al producirse mayor secreción de los jugos digestivos y motilidad del aparato digestivo, se digieren con mayor rapidez, provocando el adelgazamiento característico de pacientes con hipertiroidismo.

- *Glándulas endocrinas*

El aumento de las hormonas tiroideas repercute en el resto de hormonas endocrinas. Esto puede generar algunos de los síntomas del hipertiroidismo, temblor muscular, aumento de la insulina o del cansancio y nerviosismo.

- *Sistema cardiovascular*

Los efectos que se conoce que el hipertiroidismo tiene en el aparato cardiovascular, derivan de los nombrados con anterioridad.

El aumento del metabolismo repercute en una aceleración del consumo de oxígeno y liberación de cantidades excesivas de productos metabólicos. Esto crea una dilatación de la mayoría de los vasos, haciéndose más pronunciada en la piel al tener que evacuar mayor cantidad de calor derivado del aumento del metabolismo basal. El flujo sanguíneo aumenta en un 60 por ciento o más de sus valores normales. El mayor consumo de oxígeno y, por lo tanto, de producción de deshechos metabólicos, provoca el aumento de la frecuencia y la profundidad de la respiración.

Al mismo tiempo se eleva mucho más la frecuencia cardiaca, debido al incremento del flujo sanguíneo y, por tanto, del gasto cardiaco.

La mayor actividad enzimática, deriva en un aumento de la fuerza del corazón, efecto análogo al que se produce en presencia de febrícula o durante el ejercicio. Pero, cuando se secreta excesiva cantidad de hormonas, la potencia del músculo cardiaco se deprime, debido a un catabolismo excesivo y prolongado.

Por el contrario, a todos los efectos vistos hasta ahora, la presión arterial media suele permanecer dentro de los valores normales.

Tras el estudio anterior de los diversos efectos fisiológicos del exceso de segregación de hormona tiroidea, deben quedar claros casi todos los efectos del hipertiroidismo.

Para finalizar con la breve introducción sobre esta enfermedad, se mencionan las causas que la crean. El aumento de la glándula tiroides sumada a una hiperplasia^(*) y un plegamiento del revestimiento de las células foliculares en los folículos causan el aumento del número de células y su secreción se multiplica de forma considerable.

ANEXO I. Resultados del modelo para individuo con hipertiroidismo

Este anexo recoge los resultados de todos los análisis realizados para individuos con hipertiroidismo. Se han obtenido con la herramienta de resolución de ecuaciones “EES”.

1.1. Balance de energía

Tabla I.1. Resultados del balance energético pacientes con hipertiroidismo.

HIPERTIROIDISMO		
Eficiencia	18,31	[%]
\dot{M}	13,06	[W]
ΔP	12,27	[kPa]
p_o	101,3	[kPa]
p	113,6	[kPa]
$PCS(O_2)$	19,65	[kJ/l]
\dot{Q}	10,67	[W]
\dot{V}	$1,951 \times 10^{-4}$	[m ³ /s]
$\dot{V}_{corazon}(O_2)$	0,665	[ml/s]
\dot{W}	2,393	[W]

1.2. Flujos de sangre en el corazón

Tabla I.2. y I.3. Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida de la aorta (izq. I.2.) y entrada coronaria (derch. I.3.). Hipertiroidismo.

CAUDAL 1 – Salida aorta			CAUDAL 2 – Entrada coronaria		
\dot{V}_1	195,1	[ml/s]	\dot{V}_2	7,803	[ml/s]
$\dot{V}_1(as)$	$8,411 \times 10^{-3}$	[ml/s]	$\dot{V}_2(as)$	$3,364 \times 10^{-4}$	[ml/s]
$\dot{V}_1(glu)$	$5,605 \times 10^{-5}$	[ml/s]	$\dot{V}_2(glu)$	$2,242 \times 10^{-6}$	[ml/s]
$\dot{V}_1(O_2)$	16,63	[ml/s]	$\dot{V}_2(O_2)$	0,665	[ml/s]
$\dot{V}_1(otros)$	178,4	[ml/s]	$\dot{V}_2(otros)$	7,137	[ml/s]

Tabla I.4. Resultados los flujos de sangre del corazón. Salida coronaria. Hipertiroidismo.

CAUDAL 4 – Salida coronaria					
\dot{V}_4	7,803	[ml/s]	$\dot{V}_4(H_2O)$	$3,767 \times 10^{-4}$	[ml/s]
$\dot{V}_4(CO_2)$	0,4655	[ml/s]	$\dot{V}_4(otros)$	7,337	[ml/s]

Tabla I.5. y I.6. Datos necesarios. Caudales másicos (izq. I.5.) y datos necesarios (derch. I.6.)

CAUDAL MÁSICO – Consumo miocardio			DATOS NECESARIOS		
\dot{m}_{as}	$3,165 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{CO2/as}$	2,785	[kg/kg]
\dot{m}_{CO2}	$9,14 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{CO2/glu}$	1,466	[kg/kg]
\dot{m}_{glu}	$2,227 \times 10^{-8}$	[kg/s]	$m_{H2O/as}$	1,14	[kg/kg]
\dot{m}_{H2O}	$3,742 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{H2O/glu}$	0,6	[kg/kg]
\dot{m}_{O2}	$9,494 \times 10^{-7}$	[kg/s]	$m_{O2/as}$	2,925	[kg/kg]
			$m_{O2/glu}$	1,066	[kg/kg]
			RQ	0,7	[–]
			$V_{corazon}(CO_2)$	0,4655	[ml/s]

I.3. Balance de exergía**Tabla I.7. y I.8.** Exergía específicas. Total (izq. I.7.) y física (derch. I.8.) Hipertiroidismo.

EXERGÍA ESPECÍFICA - Total			EXERGÍA ESPECÍFICA - Física		
b_{as}	-3662	[kJ/kg]	bf_{as}	0,4018	[kJ/kg]
b_{CO2}	-10382	[kJ/kg]	bf_{CO2}	6,634	[kJ/kg]
b_{glu}	-7409	[kJ/kg]	bf_{glu}	0,9719	[kJ/kg]
b_{H2O}	-17021	[kJ/kg]	bf_{H2O}	0,9719	[kJ/kg]
b_{O2}	-1901	[kJ/kg]	bf_{O2}	9,063	[kJ/kg]

Tabla I.9. y I.10. Exergía específicas. Química (izq. I.9.) y disolución (derch. I.10.) Hipertiroidismo.

EXERGÍA ESPECÍFICA - Química			EXERGÍA ESPECÍFICA - Disolución		
bq_{as}	-3662	[kJ/kg]	bs_{CO2}	0,2844	[kJ/kg]
bq_{CO2}	-10389	[kJ/kg]	bs_{glu}	0,01404	[kJ/kg]
bq_{glu}	-7410	[kJ/kg]	bs_{O2}	0,3911	[kJ/kg]
bq_{H2O}	-17022	[kJ/kg]			
bq_{O2}	-1910	[kJ/kg]			

Tabla I.11. Exergía del corazón. Hipertiroidismo.

EXERGÍA DEL CORAZÓN		
\dot{B}_{in}	-3,128	[W]
\dot{B}_{out}	-15,86	[W]
\dot{B}_d	10,75	[W]

1.4. Datos de los compuestos

Entre individuos sanos y con hipertiroidismo no se produce variación de los datos de los compuestos que intervienen en la producción de energía.