

# Método analítico para determinar concesiones y análisis de rendimiento

*Antonio Pardo Rosado*  
*Luis E. Pardo Rosado*  
Candidatos a graduación

## Sinopsis

Se desarrolló un método analítico para determinar concesiones y análisis de rendimiento basado en la fisiología humana. La teoría sobre la capacidad humana para trabajar es análoga a la curva de fatiga de acero que se usa para diseño estructural. La teoría se usa en la medicina para detectar problemas cardio-pulmonares; también en la medicina deportiva para medir el rendimiento de los atletas. Aunque este campo está dominado por la medicina, tratamos de traer los conceptos al ambiente de ingeniería y se convirtieron todas las fórmulas y tablas para orientarlas al uso práctico industrial.

## Abstract

We developed an analytical method to determine allowances and performance ratings based on human physiology. The theory about the human capacity to do work is analogous to the graph of steel fatigue used for structural design. This theory is used in medicine to detect cardio-pulmonary problems as well as to measure the performance of athletes. This field is dominated by medicine, but we were able to translate those concepts to the engineering environment and thus we adapted fomulac and tables for practical industrial use.

### Teoría sobre el metabolismo

El cuerpo humano trabaja como una máquina cuyo combustible son los alimentos; también necesita oxígeno para poder convertir la energía química en trabajo. El aire se respira del ambiente y se lleva a los alveolos, en los pulmones, donde se separa el oxígeno de la mezcla de gases. La sangre transporta el oxígeno en la oxihemoglobina en los glóbulos rojos y lo lleva hasta los mitocondrios de las células. A nivel celular ocurre la transformación energética que conlleva la contracción de los músculos al tiempo que las mitocondrias excretan bióxido de carbono. Los nutrientes se convierten en trifosfato de adenosina (ATP, por sus siglas en inglés), el que se produce a una razón apropiada para su consumo.

Si se utiliza el oxígeno en un trabajo aeróbico, el sustrato energético puede ser los carbohidratos o las grasas. Las proteínas se usan sólo en casos de hambruna. En un proceso anaeróbico el ATP se sigue produciendo, los carbohidratos son el sustrato energético obligado y el producto final es ácido láctico. Para producir la misma cantidad de ATP anaeróbicamente se requiere 18 veces la cantidad del proceso aeróbico.

### Sistema esqueleto muscular

Hay tres sistemas de conversión energética en nuestros músculos. Dos de estos sistemas son anaeróbicos. Estos son el sistema ATP-CP o de energía inmediata y el sistema de ácido láctico o de energía de corta duración. El tercer sistema de conversión energética es el aeróbico. Nuestro trabajo propone un sistema que se basa en la planificación de tareas que se realizan con trabajo aeróbico, ya que este sistema es el que provee energía sostenida por un tiempo casi ilimitado. Para un individuo que comienza a ejercitarse, el consumo de  $O_2$  aumenta logarítmicamente hasta alcanzar un nivel estable constante.

Este nivel de ejercicio, aunque depende de la condición física del sujeto, se puede mantener por un largo periodo de tiempo, pues la

producción de ácido láctico es mínima y los factores que ocasionan el cansancio son la pérdida de fluidos y electrolitos, el gasto de la glucosa en la sangre y de glicógeno en el hígado y en los músculos que estén en función. Una vez esta reserva de glicógeno se agota, la capacidad de trabajar del individuo se disminuye drásticamente.

### **Déficit de oxígeno**

El concepto del déficit de oxígeno lo descubrió Archibald Vivian Hill (premio Nobel 1922); desde entonces muchos otros investigadores han mejorado su comprensión. El déficit de oxígeno establece que la energía proveniente de fuentes anaeróbicas compensa la escasez de energía que proviene del sistema aeróbico hasta que el rendimiento de la fuente aeróbica llega al nivel estable de consumo aeróbico para la actividad que se esté realizando. Luego, al cesar la actividad, se resientizan los fosfatos (ATP y CP) que se consumieron en el déficit de oxígeno en el proceso llamado débito de oxígeno. Este concepto establece que una persona se restablece de una actividad física cuando el consumo de oxígeno retorna a los niveles de descanso.

El sistema aeróbico es el sistema que más se usa para proveerle energía a las actividades del individuo y funciona dentro de los parámetros conocidos como nivel de descanso o de metabolismo basal (que es la energía mínima que mantiene el organismo en funcionamiento durante los periodos de descanso) y la capacidad máxima aeróbica (que es el máximo nivel de respiración y que es el límite máximo para poder realizar trabajo sostenido de cada individuo). La capacidad máxima aeróbica se denota como  $VO_{2\text{máx}}$ , las unidades son volúmenes de oxígeno.

### **Barrera anaeróbica**

La barrera anaeróbica ("anaerobic threshold") es el punto donde el sistema energético se convierte en uno compuesto de los sistemas aeróbico y de ácido láctico. Este punto se puede definir cuando la cantidad de

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

oxígeno respirado es igual a la cantidad de bióxido de carbono exhalado (Zavala, 1987). Este exceso de bióxido de carbono no proviene del proceso aeróbico, sino del sistema de ácido láctico que entra en función. Cuando el ritmo de trabajo en un sujeto pasa de la barrera anaeróbica, el consumo de oxígeno aumenta rápidamente y el individuo produce ácido láctico. La barrera anaeróbica es un tema central en la fisiología del ejercicio, pues se define como el punto máximo de consumo de oxígeno que se puede mantener sin incrementar el lactato en la sangre. Poco después el trabajo le resulta intolerable al individuo (Zavala, 1987). Esto significa que cuando aumenta la cantidad de ácido láctico, el individuo requiere más tiempo para llegar a un nivel de recuperación (de descanso). Normalmente, este punto de la barrera anaeróbica se encuentra entre 50% a 60% del  $VO_{2\text{máx}}$ , con un límite inferior del 40% en sujetos no entrenados (atletas). No obstante, con entrenamiento este punto puede llegar hasta 90% de  $VO_{2\text{máx}}$ . Las personas con una barrera anaeróbica demasiado baja padecen de enfermedades cardiovasculares (Zavala, 1987)

### Calorimetría

El gasto de energía en los seres humanos se puede medir usando la calorimetría directa e indirecta. La cantidad de calor que libera un ser humano se puede medir directamente determinando el contenido calórico de los alimentos que el individuo consume y mediante el uso de un artefacto diseñado por los doctores Frank I. Katch y William D. McArdle (1985). El artefacto consiste de una cámara isotérmica donde el calor expedido por el cuerpo humano lo absorbe un tubo en espiral por donde corre agua fría. La diferencia entre la temperatura del agua que sale del sistema y la que entra refleja la producción de calor.

El bióxido de carbono se remueve químicamente y el oxígeno lo suplente una fuente externa. La calorimetría directa es muy exacta, pero difícil de practicar. La calorimetría indirecta es muy importante para efectos teóricos aunque sea impráctica para medir la mayoría de las actividades humanas de ejercicio y trabajo (McArdle et al., 1985). Por esta razón, en la gran

mayoría de los estudios al respecto se usa calorimetría indirecta.

Todo el metabolismo depende ulteriormente de la utilización del oxígeno. Por lo tanto, bajo condiciones estables, es posible obtener un estimado indirecto del consumo de energía metabólica (McArdle et al., 1985). Se ha comprobado que por cada litro de oxígeno consumido se queman 4.82 kilocalorías de alimentos. Hay dos tipos de equipos para medir el consumo de oxígeno: el "spirometer" de circuito abierto y el de circuito cerrado. La diferencia entre ambos es que el sistema abierto extrae el oxígeno directamente del ambiente mientras que en el cerrado todo el oxígeno respirado viene del aparato. Otra diferencia importante es que el aparato de sistema abierto portátil puede usarse en actividades al aire libre.

El uso del consumo de oxígeno para estimar el gasto calórico es muy exacto. Se ha probado en animales de laboratorio que el sistema cerrado tiene una diferencia menor al 0.22% a la calorimetría directa y el sistema abierto tiene una diferencia menor al 1% (McArdle et al., 1985).

### Metabolismo basal

Hay un nivel mínimo de energía requerida para mantener las funciones vitales y se denomina la razón del metabolismo basal (BMR, por sus siglas en inglés). El BMR se encuentra entre 160 y 290 ml de oxígeno por minuto. Durante el siglo pasado se observó que el metabolismo durante el descanso era proporcional al área de superficie del cuerpo. Pruebas de laboratorio (McArdle et al., 1985) comprueban que se puede usar una curva para determinar la producción de calor por área de superficie y que las medidas obtenidas de este cómputo difieren por menos de 10% de las rigurosas pruebas de laboratorio. Para nuestro proyecto se usó una curva de kcal/m<sup>2</sup> y un nomógrafo (Apéndice 1) para determinar el área de superficie de un individuo.

Los atletas olímpicos, debido a su entrenamiento, tienen un nivel basal 10 veces mayor que el normal. Otro factor que aumenta el nivel del

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

metabolismo más de 10% es el comer mucho. En los climas tropicales las personas tienen el nivel del metabolismo basal entre 5% a 20% más alto que el normal.

### Uso del ritmo cardíaco para estimar el consumo de energía

Hay una relación proporcional entre el consumo de oxígeno y el ritmo cardíaco. Naturalmente, para cada persona esta relación cambia ya que las características fisiológicas son distintas en cada ser humano. No obstante, dependiendo de factores como la edad, el peso, la altura, el desarrollo físico y de si la persona fuma, los seres humanos se pueden categorizar por grupos.

Hay pruebas, tales como la de escaleras ("step test"), que se utilizan para determinar parámetros fisiológicos tales como la máxima capacidad aeróbica ( $VO_2_{m\acute{a}x.}$ ), que funcionan con 95% de confiabilidad y un 15% de error (McArdle et al., 1985). La mayoría de los autores consideran este método poco exacto y no apto para pruebas de laboratorio pero, por su fácil aplicación, puede utilizarse eficazmente con números grandes de personas con una exactitud aceptable (McArdle et al., 1985).

Para obtener el consumo de calorías por este método se requieren dos puntos de la relación lineal entre el consumo de oxígeno y el ritmo cardíaco: la capacidad máxima aeróbica y el metabolismo basal. Para este propósito se provee el homógrafo y las fórmulas adecuadas para conseguir  $VO_2_{m\acute{a}x.}$  y  $HR_{m\acute{a}x.}$  (HR, siglas en inglés para ritmo cardíaco). El HR mínimo o de descanso puede obtenerse tomándole el pulso al sujeto bajo estudio. Con estos puntos es fácil obtener la ecuación de la línea de una persona utilizando la fórmula de la ecuación punto pendiente. Luego, sustituyendo el ritmo cardíaco de una actividad específica, se puede obtener el consumo de oxígeno que puede transformarse a calorías por la conversión de 4.82 kcal por cada litro de oxígeno consumido.

## Teoría del cansancio

Desde los inicios de la ingeniería industrial se trató de maximizar el trabajo minimizando el cansancio y el tiempo improductivo. Esto se lograba desechando movimientos innecesarios durante las tareas de los obreros. Los sistemas de tiempos predeterminados se crearon para planificar efectivamente las tareas. Estos sistemas contenían suficiente tiempo de concesiones para que el operador pudiera tener una tolerancia razonable para satisfacer cualquier necesidad personal durante el turno de trabajo. Sin embargo, bajo condiciones extremas como movimientos usando demasiado peso, subir escaleras y otros, los sistemas de tiempo predeterminado fallan debido al cansancio.

El cansancio extremo que podría ocurrir en un turno de trabajo, se debe a que el trabajo se está realizando con esfuerzos aeróbicos y anaeróbicos combinados. Esto ocurre cuando la persona se encuentra en un ritmo de trabajo mayor a un tercio o dos quintos de su capacidad máxima aeróbica, lo que significa que se ha traspasado la barrera anaeróbica y el individuo está acumulando ácido láctico. En este caso se pueden simplificar los movimientos agotadores o incrementar el tiempo de concesiones. El método de simplificación del trabajo a fin de reducir el tiempo de producir una pieza también se puede usar para reducir movimientos agotadores. Si no se pueden cambiar estos movimientos, entonces hay que aumentar el tiempo de concesiones.

## Nivel de trabajo

Cuando se realiza un trabajo repetitivo y consecutivo el consumo de oxígeno aumenta logarítmicamente hasta que se estabiliza y se mantiene estable hasta el fin de la actividad. Este nivel es representativo del gasto metabólico sostenido para mantener la actividad; se mide en porcentaje de la capacidad máxima aeróbica y puede denotarse como un porcentaje de  $VO_2 \text{ máx.}$

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

Está establecido que el máximo esfuerzo ejercitable es el  $VO_{2\text{máx}}$  y que se puede mantener durante 3 a 5 minutos. Este esfuerzo solo puede hacerse dos veces al día (Salvendy, 1982). La recuperación para un nivel de trabajo máximo necesitaría de cuatro a ocho horas. Para niveles de 40%  $VO_{2\text{máx}}$ , los trabajadores necesitan tan solo dos descansos adicionales para contrarrestar el cansancio. No obstante, para un nivel de 50%  $VO_{2\text{máx}}$ , los trabajadores con condición física atlética pueden mantener un turno completo de trabajo.

Hay diversos niveles de energía que una persona puede sostener. Estos niveles varían de acuerdo a la condición física y la salud del individuo. Sin embargo, el nivel mínimo aceptable para una persona sana es 40%  $VO_{2\text{máx}}$  (McArdle et al., 1985). Si consideramos que un trabajo es metabólicamente estable (los niveles ni suben ni bajan) y las condiciones de trabajo son adecuadas (no hace demasiado calor y no se está bajo el sol), cualquier persona puede trabajar al 40%  $VO_{2\text{máx}}$ . Bajo otras condiciones como trabajar bajo el sol, demasiado calor (sobre 85°F), o el trabajo que se desempeña contiene esfuerzos ocasionales mayores al 50%  $VO_{2\text{máx}}$ , entonces 33% será un nivel adecuado.

### Curva del cansancio

Si es necesario hacer un trabajo que excede los niveles de trabajo establecidos como máximos (40% o 33%, según sea el caso), entonces hay que establecer concesiones de tiempo adicionales. Entiéndase que se va a producir exceso de cansancio porque este nivel de trabajo está sobre el punto de la barrera anaeróbica.

Hay una relación entre el tiempo de descanso y el nivel de trabajo: mientras mayor es el nivel metabólico de trabajo, mayor es la duración del descanso para poder alcanzar una recuperación total. Se ha establecido que

$$R = \frac{T(K - AP)}{K - RL} \quad (1)$$

donde R es el tiempo necesario para alcanzar el descanso. T es la duración

del trabajo en minutos (se acostumbra usar 60 para establecer cuántos minutos de descanso por cada hora de trabajo). K es el nivel metabólico de trabajo expresado en ml/kg/min (McArdle et al., 1985). AP es el punto anaeróbico o nivel de trabajo máximo sin llegar al cansancio expresado en ml/kg/min y RL representa el nivel de descanso expresado en ml/kg/min. Se puede proyectar una curva logarítmica que aumenta según aumenta el nivel metabólico y se acerca asintóticamente a 60, que es el tiempo total I.

### Duración del descanso

La duración de los descansos está relacionada con el tiempo en que el ácido láctico se elimina. Un individuo se recupera cuando el metabolismo haya retornado a los niveles de descanso y las reservas de fosfatos en los músculos se hayan recuperado. Esta recuperación ocurre cuando el ácido láctico se elimina de la sangre. Por lo tanto, un indicador de la recuperación del individuo es el ácido láctico y podemos decir que el individuo ha descansado cuando elimina todo el lactato de la sangre. La eliminación de ácido láctico posee una razón constante de 3 mg/min. (McCormic, and Sanders, 1982). Se ha establecido a base del doble de esta razón (Zavala, 1987):

$$T_r = 8.8 \ln (f \text{ VO}_{2 \text{ máx.}} - 0.5) + 24.6 \quad (2)$$

$T_r$  es el tiempo requerido para poder recuperarse en minutos y  $f \text{ VO}_{2 \text{ máx.}}$  es el porcentaje de  $\text{VO}_{2 \text{ máx.}}$  correspondiente al nivel de trabajo.

### Relaciones matemáticas

#### 1. Máxima capacidad aeróbica ("treadmill").

Las ecuaciones (3) a (6) definen la capacidad máxima aeróbica para diferentes personas.

Para varones con peso normal (ml/seg),

Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

5. Tiempo para la recuperación muscular (min) 
$$T_{rec} = \frac{VO_{2\text{ máx.}} - (0.413 * A) * W}{156.36} \quad (3)$$

Para varones con sobrepeso (ml/seg).

$$VO_{2\text{ máx.}} = [56.36 - (0.413 * A)] * [(0.79 * H) - 60.7] \quad (4)$$

Para hembras con peso normal (ml/seg)

$$VO_{2\text{ máx.}} = [44.37 - (0.413 * A)] * W \quad (5)$$

Para hembras con sobrepeso (ml/seg)

$$VO_{2\text{ máx.}} = [44.37 - (0.413 * A)] * [(0.79 * H) - 68.2] \quad (6)$$

donde W = peso en kg., H = altura en cm. y A = edad en años.

Para adultos saludables (fórmula de Shepard P. Astrand, I. Astrand y Lange Anderson)

Varones (ml/kg/min)

$$60 - 0.55 * \text{edad} \pm 7.5 * (ED) \quad (7)$$

Hembras (ml/kg/min)

$$48 - 0.37 * \text{edad} \pm 7. * (ED) \quad (8)$$

2. Máxima capacidad cardíaca esperada

$$HR_{\text{máx.}} = 220 - (\text{edad en años}) * (\text{latidos} / \text{minuto}) \quad (9)$$

3. Capacidad máxima de trabajo esperada

$$WR_{\text{máx.}} = VO_{\text{máx.}} - [3.5 * W] / 12.24 \quad (10)$$

en la cual WR se expresa en vatios y W es el peso en kilogramos.

4. Tiempo de concesiones por hora de trabajo

$$R_{\text{min}} = \frac{T(K - AT)}{K - RL} \quad (11)$$

$$T_r = 8.8 \text{ Ln } (f \text{ VO}_2 \text{ máx.} - 0.5) + 24.6 \quad (12)$$

### Procedimiento para determinar concesiones y análisis de rendimiento

Esta sección contiene tablas del costo metabólico de actividades industriales y tablas que contienen los valores de  $\text{VO}_2 \text{ máx.}$  para grupos de hombres y mujeres por edad. Con todo lo que se provee es posible establecer nuevos tiempos de descanso ajustados a las necesidades de los individuos de forma predeterminada.

El método de concesiones que propulsamos está diseñado para usarse bajo las siguientes condiciones:

- se han planificado las tareas de algún trabajo utilizando MIM o MOST y la naturaleza del trabajo es demasiado fatigante para el operario
- se ha observado que los operarios no pueden completar todo su trabajo o se encuentran bajo el estándar debido, según se sospecha, al cansancio.

El primer paso para determinar el tiempo de concesiones por concepto de cansancio es estimar el gasto metabólico incurrido al realizar el trabajo. Para estimar el gasto metabólico del trabajo podemos utilizar uno de tres métodos, dependiendo de la naturaleza de los métodos que se estén utilizando para medir el tiempo estándar de producción. Para MIM y MOST se proveen tablas compatibles fáciles de usar y también se ofrecen tablas de trabajo metabólico por el tipo de trabajo. Si no se puede usar ninguno de los dos anteriores, entonces se puede usar el método experimental usando un "spirométer" o tomándoles el pulso a los operarios (que es menos exacto).

Para determinar el gasto metabólico usando el sistema compatible con MIM o MOST se usa la sumatoria de la multiplicación de los índices de los movimientos fundamentales por el gasto metabólico adecuado que se encuentra en las tablas provistas anteriormente. Luego al gasto metabólico se le cambian las unidades del sistema.

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

### Costo metabólico de actividades industriales

Para un ciclo de trabajo:

$$VO_2 = \sum (\text{índice} * \text{gasto}) \quad (13)$$

Se puede obtener el costo metabólico de una actividad específica si ésta aparece en alguna tabla general. Para esos casos se usa el método experimental, que se basa en obtener directamente lecturas de los trabajadores. Hay dos formas de obtener el gasto metabólico de forma experimental utilizando el concepto de calorimetría indirecta: usando un "spirometer" (preferiblemente uno del tipo abierto por su fácil aplicación) o estimarlo usando el ritmo cardíaco. Las tablas 1, 2 y 3 detallan los costos metabólicos de actividades industriales para el sistema MIM.

Tabla 1. Costo metabólico de actividades para sistema MIM

Compatibles con MIM	ml de O <sub>2</sub> / kg /MU
REACH: Sentado, 1 brazo	0.00355
REACH: Sentado, 2 brazos	0.00474
REACH: Parado	0.00525
MOVE: 19.9 lb o menos	0.00630
MOVE: 20.0 a 44.0 lb.	0.00945
MOVE: 44.1 a 66.0 lb.	0.01260
MOVE: 66.1 a 83.6 lb.	0.01575
MOVE: 93.7 a 100 lb.	0.01785
TURN AND APPLY PRESSURE	0.00525
GRASP: Menos de 45 lb.	0.00840
GRASP: Más de 45 lb.	0.00840
POSITION DISENGAGE: Sentado	0.00318
POSITION DISENGAGE: Parado	0.00375
FOOT MOTION	0.00525
FOOT MOTION WITH HEAVY PRESSURE	0.01098
SIDE STEP	0.01098
BEND AND RISE	0.01218
SIT	0.00474
WALK	0.00972

Tabla 2. Costo metabólico de actividades para sistema MOST

Compatibles con MOST	ml de O <sub>2</sub> / kg/MOST
ACTION DISTANCE: Sin llevar peso	0.0834
ACTION DISTANCE: Llevando 20 a 44 lb.	0.0945
ACTION DISTANCE: Llevando 44 a 64 lb.	0.1260
ACTION DISTANCE: Llevando 64 a 84 lb.	0.1575
ACTION DISTANCE: Llevando 84 a 100 lb.	0.1785
ACTION DISTANCE: Empujando carro < 75 lb.	0.0888
ACTION DISTANCE: Empujando carro > 75 lb.	0.0945
BODY MOTION: Bend and rise 50%	0.0840
BODY MOTION: Bend and rise	0.1218
BODY MOTION: Climb (sin peso)	0.1416
BODY MOTION: Climb (menos de 44 lb.)	0.1866
BODY MOTION: Climb (más de 44 lb.)	0.2747
GAIN CONTROL: Light object (menos de 45 lb.)	0.0735
GAIN CONTROL: Heavy object (más de 45 lb.)	0.0840
GAIN CONTROL: Disengage	0.0840
GAIN CONTROL: Interlocked	0.0840
GAIN CONTROL: Collect (menos de 45 lb.)	0.0735
GAIN CONTROL: Collect (más de 45 lb.)	0.0840
PLACE: Loose fit. Adjustment light pressure	0.0525
PLACE: Doble care precision	0.0525
PLACE: Heavy pressure	0.0735
PLACE: Blind or unstructured intermediate moves	0.0525

Tabla 3. Costo metabólico de otras actividades

Misceláneas	ml/kg/Tmu	ml/kg/Most
Manejar automóvil "AUTCO"		0.0255
Manejar "truck"		0.0318
Manejar "finger lift truck"		0.0630
Subir escaleras (sin peso)	0.01476	0.1476
Trabajo clerical	0.00318	0.0255
Usar herramienta neumática	0.01260	0.1260
Arrastrar objeto de 80 lb.		0.1680

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

### Determinación del $VO_2$ máx. de un grupo

Las tablas 4 y 5 muestran los consumos máximos de oxígeno para mujeres y hombres, respectivamente. Se recomienda usar esta tabla para clasificar grupos en contraposición del uso de la fórmula individual.

Tabla 4. Máximo consumo de oxígeno para mujeres (ml/kg/min)

Edad (años)	Bajo	Aceptable	Medio	Bueno	Alto
20-29	<24	24-30	31-37	38-48	49+
30-39	<20	20-27	28-33	34-44	45+
40-49	<17	17-23	24-30	31-41	42+
50-59	<15	15-20	21-27	28-37	38+
60-69	<13	13-17	18-23	24-34	35+

+Exercise Testing and Training of Apparently Healthy Individuals: A Handbook for Physicians, American Heart Association. 1972 p. 15.

Tabla 5. Máximo consumo de oxígeno para hombres (ml/kg/min)

Edad (años)	Bajo	Aceptable	Medio	Bueno	Alto
20-29	<25	25-33	34-42	43-52	53+
30-39	<23	23-30	31-38	39-48	49+
40-49	<20	20-26	27-35	36-44	45+
50-59	<18	18-24	25-33	34-42	43+
60-69	<16	16-22	23-30	23-30	41+

+Exercise Testing and Training of Apparently Healthy Individuals: A Handbook for Physicians, American Heart Association. 1972 p. 15.

Para un cargador de cajas, hombre de 25 años que debe tener una condición física media, podemos observar que para cada clasificación por edad y condición física hay una serie de valores que van de mayor a menor (tabla 5). Por lo tanto, en este caso el consumo máximo de oxígeno está entre 34 y 42 ml/kg/min. Podemos escoger el valor mínimo para un margen de tolerancia mayor o escoger el máximo por estar los operadores muy acoplados a su trabajo y tienen una condición física adaptada a su trabajo. Sin embargo, para nuestro ejemplo usamos el valor medio de 38 ml/kg/min.

### Determinación del tiempo de concesiones por descanso

Para determinar el tiempo de concesión para descanso, primeramente es necesario saber el nivel basal medio para hombres y mujeres. Si utilizamos un nomógrafo, podemos obtener el nivel del metabolismo basal de cualquier individuo. Observando el grupo de personas a estudiar se puede obtener la altura media y el peso medio para un grupo de trabajo. Para nuestros casos la altura media es de 5 pies con 8 pulgadas, el peso medio es de 175 lb para un nivel basal medio de 1.93 ml/kg/min.

$$R = \frac{60 \text{ min/hr ( k - AP)}}{k - RL} \quad (14)$$

Para obtener el tiempo necesario para descanso sustituimos en la ecuación (14), donde k es el nivel correspondiente de trabajo, AP es el 40% de la máxima capacidad aeróbica y RL es el nivel basal o de descanso. Para el caso del cargador de cajas, k=17.95 y RL=1.93

$$R = \frac{60 \text{ min/hr (17.95 ml/kg/min - 0.4(38ml/kg/min))}}{17.95 \text{ ml/kg/min} - 1.93 \text{ ml/kg/min}} = 10.30 \frac{\text{min}}{\text{hr trabajo}} \quad (15)$$

El valor de AP=0.40(VO<sub>2 máx.</sub>) representa el nivel óptimo en el cual el trabajador no se cansa. Este valor puede variar a 33% de VO<sub>2 máx.</sub> si las condiciones de trabajo no son apropiadas, tales como trabajar bajo el sol o con demasiado calor.

### Determinación del largo y la cantidad de los descansos

Un descanso debe ser lo suficientemente prolongado para permitir la eliminación de el ácido láctico que fisiológicamente establece cuán cansado se encuentra un individuo. Para esto usamos la fórmula de la eliminación del ácido láctico:

$$T_r = 8.8 \ln (f \text{ VO}_{2 \text{ máx.}} - 0.4) + 24.6 \quad (16)$$

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

$T_r$  es el tiempo en minutos y  $f \text{VO}_2 \text{máx.}$  es el porcentaje de la capacidad aeróbica correspondiente al nivel de trabajo en fracción. Para nuestro ejemplo

$$\begin{aligned} f \text{VO}_2 \text{máx.} &= (38 - 17.95) / 38 = 0.53 \\ T_r &= 8.8 \ln (0.53 - 0.4) + 24.6 = 6.64 \text{min} \end{aligned} \quad (17)$$

Al analizar nuestro caso podemos ver que el cargador de cajas en un almacén necesita 10.30 minutos de descanso por cada hora de trabajo para un total de 82.40 minutos de descanso a lo largo de un turno de 8 horas. Restando el tiempo de descanso durante el período reglamentario de almuerzo de los cuales solo aprovechan para el análisis 10.30 minutos, entonces quedarían 72.10 minutos que el trabajador necesitará descansar durante el turno de trabajo. Entonces dividiendo 72.10 entre 6.64 obtendremos 11 descansos de 6.5 minutos. Como esta clase de trabajo es intermitente en la mayoría de los almacenes, para un mejor análisis tendríamos que averiguar cuánto en el día se descarga. En este caso durante todo el turno se acarrearon cajas.

### Análisis de rendimiento metabólico

A base de la teoría del gasto metabólico durante la ejecución de trabajos podemos decir que una persona sana ejecuta su trabajo al 100% de rendimiento. Además, un operador rinde un día justo de trabajo si se desempeña al nivel metabólico óptimo de operación durante todo el turno.

Para analizar el rendimiento metabólico de un individuo hay que obtener los valores de  $\text{HR}_{\text{máx.}}$  y  $\text{VO}_2 \text{máx.}$  usando las fórmulas individuales y el gasto del metabolismo basal usando el nomógrafo que se provee en el Apéndice 1. El HR o ritmo cardíaco de descanso de la persona se mide directamente. Por último use la ecuación (18) y obtenga el HR correspondiente a la operación:

$$HR_{oper.} = \frac{HR_{máx.} * HR_{basal}}{VO_2 máx. - VO_2 basal} (VO_2 oper.) \quad (18)$$

Para analizar el rendimiento metabólico se compara el  $HR_{oper.}$  con el ritmo cardíaco real. Hay dos formas de determinar el ritmo cardíaco, una es tomando el pulso de la persona manualmente o con un monitor de pulso que se vende actualmente en farmacias o tiendas deportivas. El ritmo cardíaco real debe estar en +/- 15 latidos del nivel operacional. Si el HR real es menor, puede ser que:

- el operador posea una condición física superior a la usada en el análisis.
- el operador esté trabajando a un ritmo más lento.
- el operador utiliza otros movimientos para realizar la operación.

Si el operador posee un HR real mayor al operacional y se observa que el rendimiento es pobre, entonces puede ser que:

- el operador posea una mala condición física.
- el operador tenga el hábito de fumar.
- el operador use movimientos indebidos no establecidos
- el operador se encuentre enfermo (¿padecimiento cardiopulmonar?).
- el operador tenga problemas de tensión nerviosa.

Si el operador arroja un rendimiento mayor y tiene un HR real mayor que el operacional significa que el operador está aumentando la producción a costa de mayor cansancio físico.

### Selección de operadores

Si se sabe el nivel de gasto metabólico de una operación, podemos saber qué capacidad física mínima es necesaria para poder realizar el trabajo adecuadamente. Para saber la condición mínima adecuada se establece primero el nivel de gasto metabólico y se multiplica por 2.5 para obtener

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

el  $VO_{2\text{ máx.}}$  necesario para realizar la operación sin cansarse. Este factor 2.5 proviene de que el límite de la barrera anaeróbica se encuentra en 40% de  $VO_{2\text{ máx.}}$ ; para obtener el 100% se multiplica entonces por 100/40 ó 2.5. Luego de obtener el  $VO_{2\text{ máx.}}$  para los candidatos, observe las tablas 4 y 5 donde aparecen  $VO_{2\text{ máx.}}$  para mujeres y hombres de distintas edades y condiciones. Si el  $VO_{2\text{ máx.}}$  calculado aparece en la lista bajo "Bueno" para una edad entre 30 y 39 o mayor, entonces es posible conseguir alguna persona que pueda hacer el trabajo sin cansarse. Para hacer esta desición utilice la formula de  $VO_{2\text{ máx.}}$  individual donde la edad, el peso y la altura son parámetros. Por último, la fórmula individual del máximo consumo de oxígeno no contempla personas que tengan el hábito de fumar, esta capacidad disminuye drásticamente si la persona fuma o alguna vez ha fumado.

### Referencias

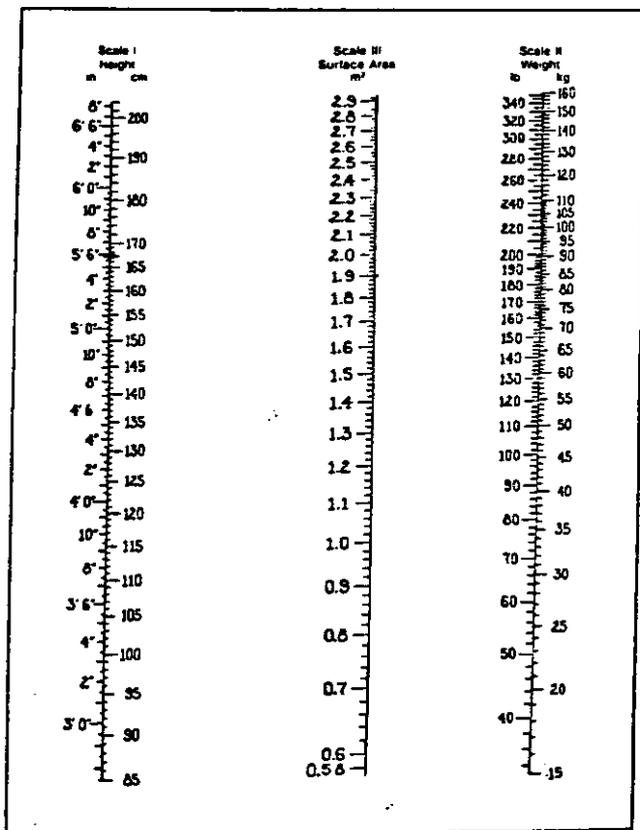
McArdle, W.D, Katch, F.I. and Katch, V.L, 1985, *Exercise Physiology*, pp 54-485

McCormic, E.J, and Sanders, M.S, 1982, *Human Factors in Engineering and Desing*, pp 183-207

Salvendy, G., 1987, *Handbook of Human Factors*, pp 803-887

Zavala, D.C., 1987, *Manual on Exercise Testing*

Apéndice 1. Nomógrafo para estimar el área de superficie corporal a base del peso y la estatura del individuo <sup>1</sup>



<sup>1</sup> McArdle et al., 1985, *Exercise Physiology*, Ed Lea & Febiger, Philadelphia.

## Apéndice 2. Glosario

### ácido láctico

Excreción de las células de los músculos que realizaron trabajo anaeróbico para compensar la insuficiencia de energía producida por el sistema aeróbico. Puede formarse de la fermentación de leche o azúcar de caña.

### aeróbico

Que respira aire. Para efectos de nuestro trabajo significa que su energía proviene del aire.

### anaeróbico

No respira aire. Otros sistemas donde no interviene la respiración directamente.

### barrera anaeróbica

Punto donde es más el bióxido de carbono que se expulsa que el oxígeno que se respira. También constituye el punto cuando se comienza a usar energía del sistema de ácido láctico.

### biosíntesis

Proceso químico dentro de las células que forman moléculas más grandes.

### calorimetría

Medida del gasto de energía en seres humanos o animales. Puede ser directa, midiendo la pérdida de calor, o indirecta, midiendo parámetros fisiológicos tales como el pulso o la respiración.

### capacidad máxima aeróbica

Consumo máximo de oxígeno que puede realizar un ser humano o animal que delimita el mayor trabajo realizable por dicho ser.

capacidad máxima cardíaca

Mayor nivel al que pueden llegar las pulsaciones del corazón de un ser humano. La capacidad máxima cardíaca y la capacidad máxima aeróbica ocurren al mismo tiempo.

cinta mecánica ("treadmill")

Aparato en el cual un ser humano se ejercita caminando sobre una cinta montada sobre rodillos. Puede tener un motor que obliga a caminar o correr a una velocidad determinada.

energía cinética muscular

Proviene de la contracción de los músculos.

energía metabólica

Proviene de los sistemas aeróbicos y anaeróbicos.

exergónico

Descarga de energía al ambiente que proviene de un proceso físico o químico. Contrario a endergónico que absorbe o almacena energía.

ergómetro

Aparato usado en pruebas de ejercicios que consta de una bicicleta fija.

glucógeno

Polisacárido formado por numerosas moléculas de glucosa conocido también como almidón animal. Constituye la reserva de hidrocarburos de los animales.

glicólisis

Sinónimo de glucólisis. Descomposición de la glucosa.

metabolismo

Cambios de energía que ocurre dentro de los seres vivos.

## Pardo y Pardo/Concesiones y análisis de rendimiento

metabolismo basal

Nivel mínimo de energía que proviene del sistema para mantener la vida de un animal. Se le llama también nivel de descanso.

mitocondrias

Parte de la célula que contiene la energía.

oxihemoglobina

Hemoglobina que transporta oxígeno a las células del cuerpo.

"spirometer"

Aparato que se usa para medir el aire que respira una persona. Se usa mayormente para determinar enfermedades cardio-respiratorias o para analizar el rendimiento de los atletas.

trifosfato de adenosina (ATP)

Compuesto rico en energía que se consume durante los procesos de energía instantánea anaeróbica. Junto al CP forman el grupo de fosfatos que se almacenan en los músculos.