

## GASTO METABOLICO DE ENERGIA

### Indice

- Introducción
- Conceptos Básicos de Metabolismo
- Métodos Usados para Evaluar la Demanda Metabólica de una Tarea
- Desarrollo del Método Predictivo AAMA
- Cálculos del Modelo
- Interpretación de los Resultados de los Cálculos
- Recomendaciones para el Rediseño de la Tarea

### *Introducción*

Los trabajos de manejo manual de materiales requieren actividades físicas tales como levantar una caja, empujar/jalar un carro, o cargar un objeto. En un proceso llamado metabolismo, el cuerpo convierte la comida y utiliza el oxígeno para dar a los músculos la energía química necesaria para producir movimiento.

Cuando la actividad física se incrementa, la demanda muscular de esa energía química también se incrementa y el cuerpo responde incrementando el ritmo cardiaco y respiratorio.

Cuando no se alcanzan los requerimientos musculares, (el gasto metabólico de energía excede la capacidad corporal de producir energía: esta capacidad es llamada Máximo Poder Aeróbico), se produce la fatiga física y se puede desarrollar un accidente cardiovascular. La fatiga física compromete la precisión, productividad y seguridad del trabajador.

Este modelo estima los requerimientos de energía para ejecutar una tarea (calculando el metabolismo total). Este valor es comparado con el Máximo Poder Aeróbico del trabajador (Capacidad de Trabajo Físico) para revelar el grado de fatiga física que producirá un trabajo de manejo manual de materiales.

### *Conceptos Básicos de Metabolismo*

Los siguientes principios y definiciones facilitaran el entendimiento del modelo metabólico.

1. El Máximo Poder Aeróbico es el mayor Gasto Metabólico de Energía que una persona puede mantener. Cuando se aplica al trabajo, el Máximo Poder Aeróbico es llamado frecuentemente Capacidad de Trabajo Físico (CTF) y es expresada en kcal/min.

2. CTF es afectada por:

⇒ edad: después de los 20 años de edad, la CTF disminuye

⇒ ritmo cardiaco máximo: al disminuir el ritmo cardiaco, disminuye la CTF (el ritmo cardiaco máximo disminuye con la edad)

⇒ salud: al mejorar la salud, se incrementa la CTF

⇒ sexo: la CTF para un hombre normal y saludable de 35 años de edad es de 16 kcal/min. Para una mujer normal y saludable de 35 años de edad es de 12 kcal/min.

⇒ duración del trabajo: La CTF se puede reducir hasta en un 40% cuando se compara una tarea ejecutada por

dos horas con la misma tarea ejecutada por ocho horas.

El Máximo Poder Aeróbico para ocho horas de trabajo continuo es el 33% de la CTF. Entonces, la capacidad límite es:

⇒ aproximadamente 5.2 kcal/min para un hombre normal y saludable de 35 años de edad.

⇒ Aproximadamente 4.0 kcal para una mujer normal y saludable de 35 años de edad.

Hay una variabilidad considerable de la CTF entre trabajadores. Algunos ergonistas estiman que el 80% de los hombres tienen una CTF menor a 5.2 kcal/min. Las decisiones de diseño se tienen que hacer considerando que para un trabajo con una duración dada, hay diferentes valores de gasto metabólico de energía para la población de trabajadores

El metabolismo total de un trabajo es el metabolismo requerido para ejecutar las actividades de un trabajo en particular. El metabolismo total es también llamado la demanda de metabolismo del trabajo y requerimientos de energía del trabajo.

### *Métodos Usados para Evaluar la Demanda Metabólica de una Tarea*

Hay diferentes métodos para determinar la demanda metabólica de un trabajo.

**Medición directa del consumo de oxígeno.**

Este método mide directamente la cantidad de oxígeno consumido mientras el trabajador ejecuta un trabajo. Este volumen es convertido a unidades de energía por un factor de escalamiento.

Es el método más preciso y confiable. Sin embargo, requiere conocimientos y equipo técnico especiales. También, este método necesita ser aplicado a un grupo de diferentes trabajadores ejecutando el mismo trabajo a fin de desarrollar información grupal del gasto metabólico de energía.

**Método de tablas**

Este método usa tablas estándar para aproximar la demanda metabólica. Hay diferentes formas en que este método es usado.

Una forma involucra comparar el trabajo que se está evaluando a una lista de trabajos industriales estándar que tienen su correspondiente gasto metabólico de energía para una persona de sexo/edad específicos ejecutando este trabajo. Con algunas modificaciones, el gasto metabólico del trabajo que se está evaluando se asume que es similar al de la tabla.

Este método es rápido y fácil. Sin embargo, no es muy preciso debido a la relevancia y calidad de los datos de las tablas.

**Predicción de variables fisiológicas.**

Dentro de esta categoría varios métodos son utilizados.

Uno de ellos determina la relación de consumo de oxígeno y el ritmo cardíaco de un estudio de laboratorio. El ritmo cardíaco es monitoreado mientras una persona ejecuta su trabajo. Un estimado del metabolismo promedio es figurado del promedio del ritmo cardíaco que se está midiendo.

La medición de la variable fisiológica requiere equipo especial y un buen entendimiento de la fisiología humana para una aplicación precisa.

### **Método Predictivo**

Este método usa un procedimiento de análisis del trabajo. Se ha determinado previamente el gasto metabólico de energía para trabajos específicos. Una vez que se ha analizado un trabajo, el gasto metabólico de energía de cada acción de las tareas es agregado para determinar el gasto metabólico de energía del trabajo.

Los modelos predictivos son rápidos, no interfieren con el trabajador y dan información de los trabajos que se están desarrollando. La debilidad en estos modelos involucra el nivel de detalle requerido para el análisis de las tareas. Cada acción de cada tarea que afecta el metabolismo debe ser reconocida e incluida en el gasto metabólico de energía total.

### ***Desarrollo del Método Predictivo AAMA***

Se determino directamente el consumo de oxigeno de 88 trabajos diferentes en cuatro plantas automotrices en

estados Unidos, además un registro de la descripción correspondiente de cada trabajo.

Los datos fueron analizados buscando la correlación del gasto metabólico de energía con tareas específicas. Algunas tareas (variables críticas) fueron consideradas mas importantes: de pie/sentado, movimiento de brazos, peso del objeto manipulado, frecuencia del ciclo de trabajo, caminar y fuerza.

Se uso un análisis de regresión para revelar la relación entre las variables críticas y la medición del metabolismo. Una correlación altamente significativa fue encontrada con las acciones de movimiento de brazos, caminar y levantar.

Se desarrollo una formula de predicción del gasto metabólico de energía:

$$\text{Metabolismo total del trabajo (kcal/h)} = 117 + (\text{brazos} * 25) + (\text{caminar} * 2.1) + (\text{levantar} * 4.4)$$

Una análisis mas reciente determino que la formula se puede mejorar al agregar el impacto de empujar/jalar. Se desarrollo una formula de predicción para empujar/jalar.

$$\text{Metabolismo de empujar/jalar (kcal/h)} = [5.2 + (2.2 * \text{fuerza de empujar/jalar})] * \text{la distancia cubierta mientras se empuja/jala}$$

Entonces:

Metabolismo Total del Trabajo =  $117 + (\text{brazos} * 25) + (\text{caminar} * 2.1) + (\text{levantar} * 4.4) + [5.2 + (2.2 * \text{fuerza de empujar/jalar})] * \text{la distancia cubierta mientras se empuja/jala}$

Cálculos del modelo

Este modelo calcula el gasto metabólico de energía sumando una constante y cuatro variables.

### **La constante**

La constante es el gasto metabólico de energía mientras se descansa. Es la energía mínima usada por un trabajador al estar en posición de ejecutar un trabajo. El valor de la constante es de 117 kcal/h.

### **La variable de los brazos**

Este factor es calculado determinando un valor para la actividad de los brazos.

- Si ocurre poco movimiento de brazos/manos, el valor = 0
- Si los movimientos de las manos/brazos esta dentro de los 50 centímetros, el valor = 1
- Si los movimientos de las manos/brazos excede los 50 centímetros, el valor = 2
- Si hay inclinación, giros y alcances extremos, el valor = 3

El valor es multiplicador por 25.

La contribución de la variable de los brazos al metabolismo total es expresada por la siguiente ecuación:

A = Contribución metabólica de la variable de los brazos  
= (valor \* 25)

### **La variable caminar**

Este factor se determina midiendo la distancia promedio cubierta al caminar en un minuto. La distancia se multiplica por 2.1. La distancia promedio no incluye la distancia caminada durante empujar/jalar, esto se considera en otra variable.

La contribución de la variable caminar al metabolismo total es expresada por la siguiente ecuación:

B = Contribución metabólica de la variable caminar =  
(distancia promedio caminada por minuto \* 2.1)

### **La variable levantar**

Este factor es derivado de multiplicar el valor de los brazos (A) multiplicado por el valor del peso, un valor de frecuencia y una constante.

Los valores del peso son:

- Si la mayoría de las partes pesan menos de 4 libras; el valor = 1
- Si la mayoría de las partes pesan entre 4 y 11 libras; el valor = 2
- Si la mayoría de las partes pesan mas de 11 libras; el valor = 3

Los valores de la frecuencia son:

Si hay menos de 2 ciclos por minuto; el valor = 1

Si hay entre 2 y cinco ciclos por minuto; el valor = 2

Si hay mas de 5 ciclos por minuto; el valor = 3

La contribución de la variable levantar al metabolismo total es expresada por la siguiente ecuación:

C = Contribución metabólica de la variable levantar =  
(valor de A \* valor del peso \* valor de la frecuencia \*  
4.4)

### **La variable empujar/jalar**

Se mide la fuerza promedio ejercida mientras se empuja/jala (en kilogramos)

Se mide la distancia promedio que se camina al empujar/jalar en un minuto (en metros). Esta distancia no se debe incluir en la variable caminar.

La contribución de la variable empujar/jalar al metabolismo total se expresa por la siguiente formula"

D = Contribución metabólica de la variable empujar/jalar  
= [(fuerza promedio empujar/jalar \* 2.2) + 5.2] \*  
distancia recorrida en un minuto mientras se empuja/jala

### *Cálculos del Modelo*

Este es un modelo aditivo por lo que se sumaran la constante y las cuatro variables del gasto metabólico de energía para darnos el metabolismo total del trabajo, también llamado requerimientos de energía del trabajo o demanda metabólica del trabajo en kcal/h.

En forma de ecuación:

Metabolismo total del trabajo(kcal/h) = 117 + A + B + C + D

### *Interpretación de los Resultados de los Cálculos*

El gasto metabólico de energía calculado de la descripción de las tareas es comparado con la Capacidad de Trabajo Físico del trabajador (la máxima tasa metabólica que un trabajador puede mantener) para una edad y sexo dados y duración del trabajo.

Don B. Chaffin describió un método para calcular la Capacidad de Trabajo Físico evaluando dos parámetros: Capacidad promedio de trabajo físico e índice de salud física.

Capacidad promedio de trabajo físico

Esta calculo da la tasa metabólica promedio máxima que un trabajador de 35 años puede mantener por un periodo de tiempo variable. Esta formula se basa en tres suposiciones:

1. Hay una tasa metabólica máxima: 16 kcal/min para un hombre y 12 kcal/min para una mujer
2. Para evitar la acumulación excesiva de desperdicio metabólico, un turno de 8 horas de trabajo debe ser limitada a: 5.2 kcal/min para hombres y 4.0 kcal/min para mujeres

3. Se reconocen restricciones sociales y económicas en la dieta, por lo que la tasa diaria debe limitarse a 2.5 kcal/min

Al tomar en cuenta estas tres suposiciones, se expresa la siguiente ecuación:

- Para un hombre

$$\text{Capacidad promedio de trabajo físico} = (\log 4400 - \log t) / 0.187$$

- Para una mujer

$$\text{Capacidad promedio de trabajo físico} = (\log 4400 - \log t) / 0.25$$

donde:

t = tiempo de actividad en minutos

$$\log 4400 = 3.64345$$

Indice de salud física

Para ampliar la aplicación de la capacidad promedio de trabajo físico y pueda ser usada para trabajadores mayores o menores de 35 años, Chaffin propuso la siguiente ecuación:

$$\text{Indice de salud física} = \text{capacidad aeróbica} / 16$$

Capacidad aeróbica = el máximo poder aeróbico de un individuo o, cuando se evalúa a un grupo de edad, el máximo poder aeróbico promedio para la edad específica.

Este factor será mayor para un grupo de edad menor de 35 años (debido a que la capacidad aeróbica de este grupo es menor que 16) y será menor para un grupo mayor de 35 años (debido a que la capacidad aeróbica de este grupo es menor que 16).

Vea las tablas que se presentan a continuación de la relación entre la edad y el índice de salud física (la relación es la misma para hombres y mujeres)

Otra forma de calcular el índice de salud física es utilizando la siguiente formula:

ISF = Índice de salud física

$$= a + bX + c/(\ln X) + d/[X*(X)^{1/2}] + (e \ln X)/X^2$$

$$a = 318.62117$$

$$d = 76753.203$$

$$b = -0.35491919$$

$$e = -90577.139$$

$$c = -1468.2914$$

$$X = \text{edad}$$

### **Capacidad de trabajo físico**

La capacidad de trabajo físico (máximo poder aeróbico) para cualquier individuo o grupo puede ser determinada calculando la capacidad promedio de trabajo físico y multiplicándola por el índice de salud física.

CTF = Capacidad promedio de trabajo físico \* índice de salud física

Al reordenar términos, se deriva una fórmula universal para la capacidad de trabajo físico para un periodo variable de tiempo de trabajo y un índice variable de nivel de salud.

Para hombres:

$$CTF = [(\log 4400 - \log t) / 0.187] * ISF$$

Para mujeres:

$$CTF = [(\log 4400 - \log t) / 0.25] * ISF$$

donde:

CTF = Capacidad de trabajo físico en kcal/min.

$\log 4400 = 3.64345$

t = tiempo de duración de las actividades en minutos

ISF = Índice de salud física

Índice de Salud Física y Capacidad de Trabajo Físico para mujeres (kcal/min)

<b>EDAD</b>	<b>ISF</b>	<b>120 min.</b>	<b>240 min.</b>	<b>480 min</b>	<b>510 min.</b>
20	1.16	7.26	5.86	4.46	4.34

25	1.13	7.07	5.71	4.35	4.23
30	1.09	6.82	5.51	4.20	4.08
35	1.00	6.26	5.05	3.85	3.74
40	0.95	5.94	4.80	3.66	3.56
45	0.93	5.82	4.70	3.58	3.48
50	0.91	5.69	4.60	3.50	3.41
55	0.88	5.51	4.45	3.39	3.29
60	0.83	5.19	4.19	3.19	3.11
65	.79	4.94	3.99	3.04	2.96

Indice de Salud Física y Capacidad de Trabajo Físico  
para hombres (kcal/min)

<b>EDAD</b>	<b>I.S.F.</b>	<b>120 min.</b>	<b>240 min.</b>	<b>480 min.</b>	<b>510 min.</b>
20	1.16	9.68	7.82	5.95	5.79
25	1.13	9.43	7.61	5.80	5.64
30	1.09	9.09	7.34	5.59	5.44
35	1.00	8.34	6.74	5.13	4.99
40	0.95	7.93	6.40	4.88	4.74
45	0.93	7.76	6.27	4.77	4.64
50	0.91	7.59	6.13	4.67	4.54
55	0.88	7.34	5.93	4.52	4.39
60	0.83	6.92	5.59	4.26	4.14
65	0.79	6.59	5.32	4.05	3.94

### **Conclusión:**

Si el calculo del metabolismo total excede la capacidad de trabajo físico, el trabajo producirá fatiga, por lo

tanto se deberán seguir controles administrativos o de ingeniería.

Si el calculo del metabolismo total es menor que la capacidad de trabajo físico, el trabajo estará dentro de los limites de la capacidad física del trabajador.

### **Recomendaciones para el rediseño de la tarea**

#### *Controles de ingeniería*

Las recomendaciones de ingeniería están basadas en los resultados de las cuatro variables (brazos, caminar, levantar y empujar/jalar). La variable con el resultado mas alto es el mayor contribuyente al metabolismo total de la tarea. Entonces, esta variable será el tema de la primera recomendación.

#### Recomendaciones específicas de ingeniería

Los cambios de diseño asociados con la variable de los brazos incluyen:

- Eliminar los alcances al doblarse, inclinarse, girar, o alcances extremos de la tarea. Esto se puede lograr al evitar levantar desde el piso, minimizando la distancia a la que se debe levantar un objeto, posicionando todos los materiales requeridos dentro de rango de los hombros a las rodillas.

Los cambios de diseño asociados con la variable de los caminar incluyen:

- Reducir la distancia de caminar/cargar. Esto se puede lograr al localizar las actividades unas cercas de las otras, instalando bandas transportadoras, utilizando montacargas, etc.

Los cambios de diseño asociados con la variable levantar incluyen:

- Si la variable de los brazos da un valor de 3, eliminar los alcances el doblarse, girar, inclinarse o alcances extremos.
- Si la variable del peso da un valor de 3, reducir el peso de las partes o herramientas.
- Si la variable de la frecuencia da un valor de 3, reducir el numero de ciclos a menos de cinco por minuto.

Los cambios de diseño asociados con la variable de empujar/jalar incluyen:

- Reducir la fuerza promedio ejercida durante empujar/jalar
- Reducir la distancia en la cual se empuja/jala

#### *Controles administrativos:*

Si los controles de ingeniería no son factibles, varios controles administrativos se pueden aplicar, tales como rotación de trabajos, ciclos de trabajo/recuperación, disminución del ritmo de trabajo, para reducir el riesgo de fatiga general.

Dos cálculos nos pueden guiar a la planeación de controles administrativos. El primero, desarrollado por Chaffin, determina la cantidad máxima de tiempo que una persona o grupo de edad puede ejecutar una tarea de una determinada demanda metabólica. El segundo determina el porcentaje de tiempo de recuperación que se debe permitir a una determinada capacidad de trabajo físico y una determinada demanda metabólica.

Tiempo máximo:

CTF = Capacidad promedio de trabajo físico \* índice de salud física

Para hombres:

$$CTF = [(\log 4400 - \log t) / 0.187] * ISF$$

Si la capacidad de trabajo físico de la persona o grupo es igual a los requerimientos de energía del trabajo (metabolismo total del trabajo o demanda metabólica del trabajo), la cantidad de tiempo de trabajo antes de desarrollar fatiga se puede determinar.

$$CTF = GME$$

$$GME = (\log 4400 - \log t) * ISF(0.187)$$

Simplificando y reordenando términos y resolviendo para  $\log t$

para hombres:

$$\log t = \log 4400 - [(GME * 0.187) / ISF]$$

para mujeres:

$$\log t = \log 4400 - [(GME * 0.25)/ISF]$$

Conociendo la cantidad de tiempo de trabajo antes de que se desarrolle la fatiga física, se puede diseñar una programación para iniciar periodos de recuperación o cambios de trabajo.

Formula de ciclo trabajo/recuperación

El siguiente calculo se desarrolló para determinar el porcentaje de tiempo de recuperación para una capacidad de trabajo físico y una demanda metabólica de trabajo

$$\% \text{ tiempo de recuperación} = [(CTF - DE)/(ED - DE)] * 100$$

% tiempo de recuperación = porcentaje de recuperación para un periodo de tiempo de ejecución de trabajo (puede aplicarse a un periodo de una hora o un periodo de ocho horas)

GME = Gasto Metabólico de Energía

DE = Tasa de demanda promedio de energía del trabajo (kcal/min)

ED = Tasa de energía promedio durante el recuperación (frecuentemente se usa 1.0 a 2.0 kcal/min)

Se pueden usar las dos fórmulas al mismo tiempo para darnos mas información útil del trabajo que se esta desarrollando.

De la formula de tiempo máximo, el analista sabe el tiempo disponible para el trabajo antes de que se

presente la fatiga. En este momento es aconsejable un tiempo de recuperación o un cambio de trabajo. La formula del ciclo trabajo recuperación aconseja cuanto tiempo se debe pasar descansando antes de regresar a la actividad de demanda alta de energía metabólica.

Si solo la formula del ciclo de trabajo/recuperación se utiliza, se puede caer en el error de dejar al trabajador ejecutar un trabajo muy estresante por largos periodos de tiempo. Este calculo da una recomendación del periodo de recuperación. Es responsabilidad del analista determinar el tiempo máximo para que el ciclo trabajo/recuperación ocurra en el tiempo apropiado durante el periodo de trabajo.

# GASTO METABOLICO DE ENERGIA

FECHA DE ANALISIS \_\_\_\_\_ PUESTO \_\_\_\_\_

DEPTO/UNIDAD \_\_\_\_\_ ANALISTA \_\_\_\_\_

PARTE/UNIDAD \_\_\_\_\_

DURACION CICLO TRABAJO\* \_\_\_\_\_ NO. DE PERSONAS EXPUESTAS \_\_\_\_\_

DESCRIPCION DEL TRABAJO \_\_\_\_\_

\* CONTINUO > 4 HORAS FRECUENTE = 1 A 4 HORAS OCASIONAL < 1 HORA

Sexo: \_\_\_\_\_ Edad: \_\_\_\_\_ Tiempo de Trabajo: \_\_\_\_\_ min

**A**

- Si ocurre poco movimiento de brazos/manos, el valor = 0
- Si los movimientos de las manos/brazos esta dentro de los 50 centímetros, el valor = 1
- Si los movimientos de las manos/brazos exceden los 50 centímetros, el valor = 2
- Si hay inclinación, giros y alcances extremos, el valor = 3

**B**

B = (distancia promedio caminada por minuto \* 2.1)

**C**

- Si la mayoría de las partes pesan menos de 1.8 kgs; el valor = 1
- Si la mayoría de las partes pesan entre 1.8 y 5 kgs; el valor = 2
- Si la mayoría de las partes pesan mas de 5 kgs; el valor = 3

Los valores de la frecuencia son:

- Si hay menos de 2 ciclos por minuto; el valor = 1
- Si hay entre 2 y cinco ciclos por minuto; el valor = 2
- Si hay mas de 5 ciclos por minuto; el valor = 3

C = Contribución metabólica de la variable levantar = (valor de A \* valor del peso \* valor de la frecuencia \* 4.4)

**D**

D = [(fuerza promedio empujar/jalar \* 2.2) + 5.2] \* distancia promedio recorrida en un minuto mientras se empuja/jala

A = [ \_\_\_\_\_ \* 25] = \_\_\_\_\_

B = [ \_\_\_\_\_ \* 2.1] = \_\_\_\_\_

C = [ \_\_\_\_\_ \* \_\_\_\_\_ \* \_\_\_\_\_ \* 4.4] = \_\_\_\_\_

D = {[ ( \_\_\_\_\_ \* 2.2) + 5.2] \* \_\_\_\_\_ } = \_\_\_\_\_

GME = 117 + \_\_\_\_\_ + \_\_\_\_\_ + \_\_\_\_\_ + \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ Kcal/hr.

GME = \_\_\_\_\_ Kcal/min

### Capacidad de trabajo físico

Para hombres:

$$CTF = [(\log 4400 - \log t) / 0.187] * ISF$$

Para mujeres:

$$CTF = [(\log 4400 - \log t) / 0.25] * ISF$$

CTF = Capacidad de trabajo físico en kcal/min.

t = time de duración de las actividades en minutos

ISF = Índice de salud física

$$= a + bX + c/(\ln X) + d/[X*(X)^{1/2}] + (e \ln X)/X^2$$

$$a = 318.62117$$

$$d = 76753.203$$

$$b = -0.35491919$$

$$e = -90577.139$$

$$c = -1468.2914$$

$$X = \text{edad}$$

**ISF =**

**CTF =**

### Tiempo máximo:

para hombres:

$$\log t = \log 4400 - [(GME * 0.187)/ISF]$$

para mujeres:

$$\log t = \log 4400 - [(GME * 0.25)/ISF]$$

**t =**

### TIEMPO DE RECUPERACION

$$\text{tiempo de recuperación} = [(CTF - GME)/(ED - GME)] * \text{Tiempo de trabajo}$$

CTF = capacidad de trabajo físico

GME = Tasa de demanda promedio de energía del trabajo (kcal/min)

ED = Tasa de energía promedio durante el recuperación (frecuentemente se usa 1.0 a 2.0 kcal/min)

**TIEMPO DE RECUPERACION =**