

**ANEXO 1 – Metodología y procedimiento para determinar los valores numéricos asociados a los parámetros a), b), c) y d), así como los valores UR y DR**

**Subcomité de Plantas**



| Revisión | Fecha          | Descripción                                                                                                                                                                                                |
|----------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0        | 2023 - 11 - 15 | El Subcomité de Plantas en la reunión 373 del 15 de noviembre de 2023 dio concepto favorable a la actualización de los anexos 1,2 y 3 del Acuerdo CNO 1670 (modelamiento de rampas plantas de generación). |

Para determinar los valores numéricos asociados a los parámetros a), b), c) y d), así como los valores UR y DR establecidos en la Resolución CREG 009 de 2003 y las que la modifiquen o sustituyan para el modelado de las rampas de aumento y disminución de los generadores térmicos, se seguirá el siguiente procedimiento por parte de los agentes generadores para cada una de las configuraciones declaradas para las plantas:

- Para cada una de las configuraciones y verificando siempre condiciones normales de operación, se realizan incrementos de generación que permitan llevar la planta desde cero (0) MW hasta el rango de disponibilidad máximo, para posteriormente, realizar disminuciones de generación hasta regresar nuevamente a cero (0) MW.
- Cada agente grafica las condiciones de aumento y disminución de sus plantas de generación térmica, por medio de curvas de Potencia de generación (MW) vs. Tiempo (horas).
- De las curvas de Potencia de generación (MW) vs. Tiempo (horas), se calcula el área bajo la curva en cada período horario, encontrándose los valores de energía para cada período horario para las condiciones operativas mencionadas en el primer ítem.
- A partir de los valores de energía para cada período horario que fueron calculados en el ítem anterior, se encuentra el modelo o la combinación de modelos más adecuada para cada unidad o planta térmica, considerando los diferentes modelos que son planteados posteriormente. Es importante tener en cuenta que los modelos 2 y 3 que serán detallados posteriormente son excluyentes entre ellos, es decir, una planta térmica solo podrá declarar parámetros para uno de los modelos.

El modelo lineal definido en la Resolución CREG 009 de 2003 para la representación de las rampas de aumento y disminución de las plantas de generación térmica es el siguiente:

Para la rampa de aumento:

$$a * Pi(t) - b * Pi(t - 1) \leq URi$$

Para la rampa de disminución:

$$c * Pi(t - 1) - d * Pi(t) \leq DRi$$

Donde:

|              |                                                                   |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|
| $UR_i$       | Rampa de aumento.                                                 |
| $DR_i$       | Rampa de disminución.                                             |
| $P_i(t)$     | Energía (MWh) despachada para la planta $i$ en el período $t$ .   |
| $P_i(t - 1)$ | Energía (MWh) despachada para la planta $i$ en el período $t-1$ . |

Con base en este modelo, a continuación, se presentan diferentes opciones para los valores numéricos asociados a los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ , así como los valores  $UR$  y  $DR$ , definidos en la Resolución CREG 009 del 2003.

### **MODELO 1: Bloques fijos de arranque y parada**

Este modelo utiliza un valor numérico de 1 para los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ , del modelo lineal establecido en la Resolución CREG 009 de 2003 ( $a = b = c = d = 1$ ). Podrá ser utilizado para declarar bloques fijos de arranque que le permitan representar las rampas de aumento desde un valor de cero (0) MWh hasta valores menores o iguales al mínimo técnico y podrá declarar los bloques fijos de parada que le permitirán representar la disminución de la generación desde valores menores o iguales al mínimo técnico hasta cero (0) MWh.

Se permitirá la declaración de un máximo de cinco (5) bloques fijos para el arranque y hasta cinco (5) bloques fijos para la parada, sin embargo, en caso de que el agente requiera una cantidad superior de bloques fijos para el modelado de la planta, deberá presentar la justificación técnica detallada para que esta sea evaluada por el Subcomité de Pantas. Estos bloques serán valores fijos, únicos y positivos en MWh para cada período durante el arranque y parada de la planta. Además, se permitirá la declaración de bloques fijos para arranque en tres estados térmicos (frío, tibio y caliente).

En este caso, con la aplicación del Modelo 1, la ecuación general toma la forma:  $P(t) - P(t-1) = UR$  y  $P(t-1) - P(t) = DR$ , la cual es aplicada únicamente entre periodos  $t$  y  $t-1$  en que la planta es programada en rampas con bloques fijos de entrada o salida. Gráficamente se tienen los bloques fijos de arranque y parada del Modelo 1 como se presenta en la Figura 1:

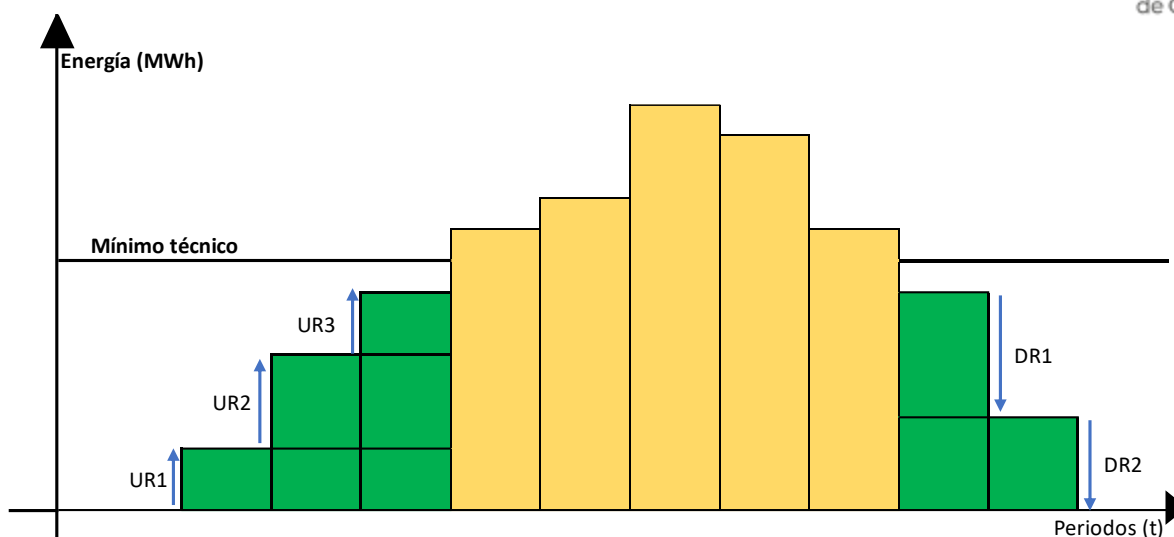


Figura1. Representación gráfica del Modelo 1.

Es importante aclarar que durante los períodos del día en que la planta térmica se encuentre programada a realizar los bloques fijos de arranque y la parada, no se considerarán para efectos de cumplir el parámetro Tiempo mínimo de generación declarado por la planta. Además, en caso de que estos bloques involucren variaciones de generación que superen el parámetro de variación máxima para tiempo de carga estable (VMTCE) no se considerará para el cumplimiento del Tiempo mínimo de carga estable (TCE).

**Nota:** Los agentes podrán declarar un único *bloque fijo especial de salida* que permite la parada de la planta térmica desde despachos superiores al mínimo técnico hasta cero, el cual será tenido en cuenta por el CND en aquellos casos en los cuales sea óptima esta operación.

Ejemplo ilustrativo para la determinación de parámetros del modelo 1:

Con el fin de lograr un mejor entendimiento para el lector sobre el uso del Modelo 1 para la representación de los bloques fijos de arranque y parada de una planta térmica, suponga la existencia de una planta térmica con un mínimo técnico de 50 MW que declara al CND un conjunto de parámetros técnicos para la definición de bloques fijos de arranque y bloques fijos de salida, como se presenta en la Tabla 1:

| Modelo 1 | Bloques UR (MWh) |       |          |    | Bloques DR (MWh) |                                 |    |
|----------|------------------|-------|----------|----|------------------|---------------------------------|----|
|          | Frío             | Tibio | Caliente |    |                  | Bloque de despachos > MT a Cero |    |
|          | UR1              | 5     | 10       | 10 | DR1              | 25                              | 30 |
|          | UR2              | 10    | 10       | 15 | DR2              | 15                              |    |
|          | UR3              | 10    | 10       | 10 | DR3              |                                 |    |
|          | UR4              | 5     | 5        |    | DR4              |                                 |    |
|          | UR5              | 5     |          |    | DR5              |                                 |    |

Tabla 1. Parámetros de ejemplo ilustrativo del modelo 1.

Partiendo de los parámetros declarados en la Tabla 1, con la aplicación de las ecuaciones del Modelo 1 se tiene que los valores de bloques fijos de arranque en caliente y de parada serían los presentados en las Tablas 2 y 3, respectivamente.

| Periodo | UR(i) | MWh |
|---------|-------|-----|
| P(0)    |       | 0   |
| UR(1)   | 10    |     |
| P(1)    |       | 10  |
| UR(2)   | 15    |     |
| P(2)    |       | 25  |
| UR(3)   | 10    |     |
| P(3)    |       | 35  |

**Tabla 2. Bloques fijos de arranque en caliente.**

| Periodo | DR(i) | MWh |
|---------|-------|-----|
| P(1)    |       | 40  |
| DR(1)   | 25    |     |
| P(2)    |       | 15  |
| DR(2)   | 15    |     |
| P(3)    |       | 0   |

**Tabla 3. Bloques fijos de parada.**

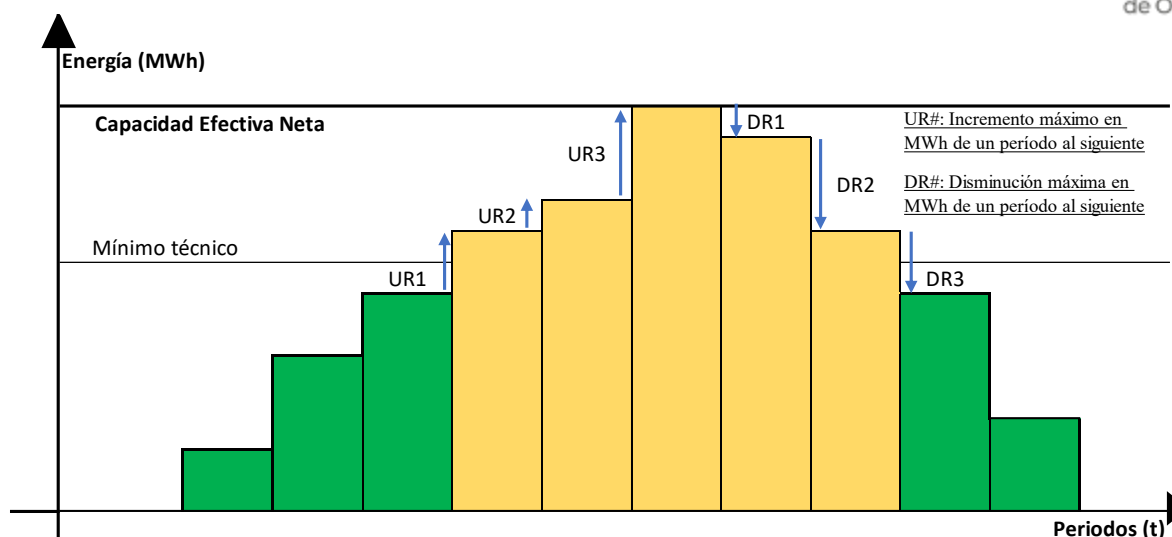
Nótese que los valores de UR y DR se aplican entre periodos en cero MWh y entre periodos de bloques fijos de arranque y parada. Además, se resalta que los valores del último bloque fijo de arranque y de parada podrán ser inferiores al valor del mínimo técnico de las plantas térmicas cumpliendo con la descripción presentada anteriormente. En caso de que la planta de generación térmica lo requiera estos valores podrían ser iguales al mínimo técnico.

## **MODELO 2: Límites máximos de aumento y disminución por intervalos (MWh)**

Este modelo utiliza un valor numérico de 1 para los parámetros a, b, c y d, del modelo lineal establecido en la Resolución CREG 009 de 2003 ( $a = b = c = d = 1$ ). Podrá ser utilizado para declarar valores máximos de aumento y disminución de la generación de la planta de un período a otro en MWh, es decir, la máxima variación en MWh que puede presentar la planta térmica para pasar de un programa de  $P(t-1)$  MWh a  $P(t)$  MWh. Este modelo podrá ser utilizado para intervalos de valores de  $P(t-1)$ , en el rango que va desde 0 MWh hasta la capacidad efectiva neta de la planta, siempre y cuando los valores de UR y DR permitan que la planta sea despachada en valores que van desde el mínimo técnico hasta la capacidad efectiva neta.

Los agentes podrán declarar la variación máxima en MWh para un máximo de cinco (5) intervalos de valores de  $P(t-1)$ , para el incremento y un máximo de cinco (5) intervalos para la disminución los cuales no podrán traslaparse. En caso de ser debidamente justificado por el agente ante el CND, se permitirá la declaración de una mayor cantidad de intervalos.

En este caso, con la aplicación del Modelo 2 la ecuación general toma la forma:  $P(t) - P(t-1) = UR$  y  $P(t-1) - P(t) = DR$ , para diferentes valores de  $P(t-1)$ . Gráficamente se tienen los límites máximos de aumento y disminución del modelo 2 como se presenta en la Figura 2.



**Figura 2. Representación gráfica del Modelo 2.**

Como se observa en la Figura 2, el modelo 2 es utilizado para representar el comportamiento de la planta térmica de generación, al menos, en el rango comprendido entre el mínimo técnico y la capacidad efectiva neta de la planta, sin embargo, este podría representar un rango que inicie en valores inferiores al mínimo técnico dando continuidad entre los modelos 1 y 2.

**Nota:** Los agentes que seleccionen este tipo de modelado, podrán declarar valores de Despacho Alternativos (UR' y DR') descritos en el Anexo 3 y serán tenidos en cuenta por el Centro Nacional de Despacho.

Ejemplo ilustrativo para la determinación de parámetros del modelo 2:

Con el fin de lograr un mejor entendimiento para el lector sobre el Modelo 2 para la representación de los límites máximos de aumento y disminución por intervalos de una planta térmica, suponga la existencia de una planta térmica con un mínimo técnico de 50 MW que declara al CND un conjunto de parámetros que se presentan en la Tabla 4.

| Modelo 2 |     | Segmento UR (MWh) |        |    |     |     | Segmento DR (MWh) |        |    |     |
|----------|-----|-------------------|--------|----|-----|-----|-------------------|--------|----|-----|
|          |     | Mínimo            | Máximo | UR | UR' |     | Mínimo            | Máximo | DR | DR' |
|          | UR1 | 35                | 60     | 30 | 10  | DR1 | 50                | 60     | 20 | 10  |
|          | UR2 | 61                | 70     | 20 |     | DR2 | 61                | 90     | 30 |     |
|          | UR3 | 71                | 110    | 40 |     | DR3 | 91                | 110    | 20 |     |
|          | UR4 |                   |        |    |     | DR4 |                   |        |    |     |
|          | UR5 |                   |        |    |     | DR5 |                   |        |    |     |

**Tabla 4. Parámetros de ejemplo ilustrativo del modelo 2.**

Para los segmentos UR descritos en la Tabla 4, la lectura que debe realizarse de los segmentos es la siguiente:

- Para un valor de  $P(t-1)$  de 35 MWh a 60 MWh (UR1), la planta puede hacer un incremento máximo de 30 MWh para la generación de  $P(t)$ .

- Para un valor de  $P(t-1)$  de 61 MWh a 70 MWh (UR2), la planta puede hacer un incremento máximo de 20 MWh para la generación de  $P(t)$ .
- Para un valor de  $P(t-1)$  de 71 MWh a 110 MWh (UR3), la planta puede hacer un incremento máximo de 40 MWh para la generación de  $P(t)$ .

Así mismo, para los segmentos DR descritos en la Tabla 4, la lectura que debe realizarse de los segmentos es la siguiente:

- Para un valor de  $P(t-1)$  de 91 MWh a 110 MWh (DR3), la planta puede hacer una disminución máxima de 20 MWh para la generación de  $P(t)$ .
- Para un valor de  $P(t-1)$  de 61 MWh a 90 MWh (DR2), la planta puede hacer una disminución máxima de 30 MWh para la generación de  $P(t)$ .
- Para un valor de  $P(t-1)$  de 50 MWh a 60 MWh (DR1), la planta puede hacer una disminución máxima de 20 MWh para la generación de  $P(t)$ .

Del ejemplo anterior, se resalta que el primer segmento UR del modelo 2 inicia desde un valor inferior al mínimo técnico, pero que al aplicar dicho primer UR1, la generación de la planta correspondería a valores superiores al mínimo técnico de la planta. Si esto se observa en conjunto con el ejemplo del modelo 1, se podrá identificar que se logra tener una continuidad entre estos modelos, de forma que se logra la representación del comportamiento de la planta durante el incremento desde 0 MWh hasta la capacidad efectiva neta. De manera similar, se podría observar que con la aplicación del DR1 de los segmentos DR del modelo 2, se logra dar continuidad al modelado de la planta disminuyendo su valor de generación al valor del primer bloque fijo de parada.

### **MODELO 3: Límites máximos de aumento y disminución lineales**

Este modelo utiliza valores numéricos diferentes a 1 para los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ . En este caso, se halla un único conjunto de valores para  $a$ ,  $b$  y UR, de tal manera que sean válidos para representar los incrementos máximos de generación en energía, de un período al siguiente, de un rango desde el mínimo técnico hasta el rango de disponibilidad máximo de la planta térmica. Así mismo, un único conjunto de valores para  $c$ ,  $d$  y DR, de tal manera que sea válido para representar las disminuciones máximas de generación en energía, de un período al siguiente, desde el rango de disponibilidad máximo de la planta hasta el mínimo técnico.

La metodología establecida para hallar los parámetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  del modelo 3 que represente el comportamiento de la planta de generación térmica, consiste en lo siguiente:

- Para la rampa de aumento (MWh/hora):

Se gráfica  $P(t-1)$  vs.  $P(t)$ , para cada valor de energía máximo posible en cada hora para llegar a la capacidad efectiva neta, partiendo desde el mínimo técnico. Con base en el conjunto de puntos graficados, se halla la ecuación de la recta que más se ajusta a la representación de estos y de allí se extraen los valores  $a$ ,  $b$  y UR de la planta a aplicar para hacer aumentos de generación desde el mínimo técnico hasta la capacidad efectiva neta.

- Para la rampa de disminución (MWh/hora):

Se gráfica  $P(t)$  vs.  $P(t-1)$ , para cada valor de energía máximo posible en cada hora para llegar al mínimo técnico, partiendo desde la capacidad efectiva neta. Con base en el conjunto de puntos graficados, se halla la ecuación de la recta que más se ajusta a la representación de estos y de allí se extraen los valores  $c$ ,  $d$  y  $DR$  de la planta a aplicar para modelar disminuciones de generación desde la capacidad efectiva neta hasta el mínimo técnico.

Ejemplo ilustrativo para la determinación de parámetros del modelo 3:

Con el fin de lograr un mejor entendimiento para el lector sobre el Modelo 3 para la representación de los límites máximos de aumento y disminución lineales de una planta térmica, suponga la existencia de una planta térmica con un mínimo técnico de 50 MW que ha obtenido los valores de generación presentados en la Tabla 5 mediante la metodología presentada.

| Período                 | Energía en el período (MWh) |
|-------------------------|-----------------------------|
| Mínimo técnico          | 50                          |
| P (1)                   | 65                          |
| P (2)                   | 78                          |
| P (3)                   | 90                          |
| P (4)                   | 110                         |
| Capacidad efectiva neta | 130                         |

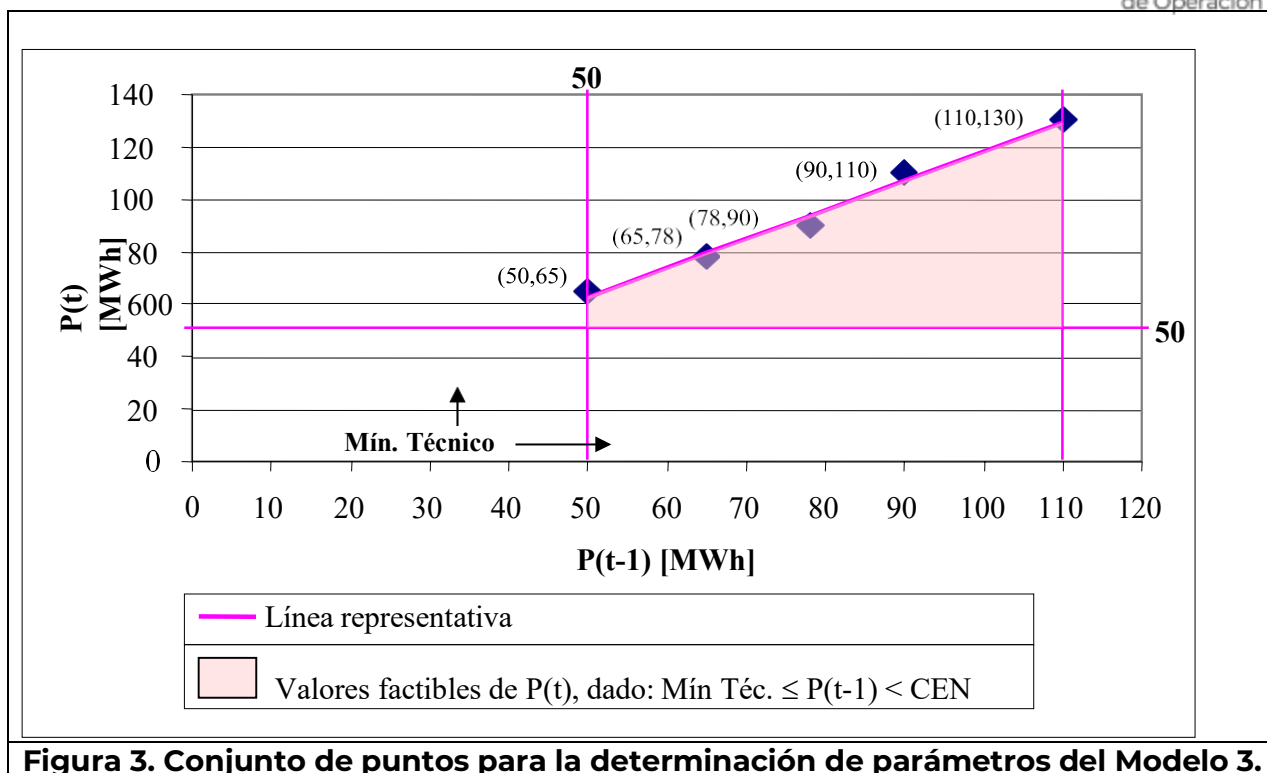
**Tabla 5. Valores de generación para el ejemplo ilustrativo del modelo 3.**

En este caso y a partir de los valores anteriores, los pares de valores de  $P(t-1)$  y  $P(t)$  para el ejemplo son los presentados en la Tabla 6.

| $P(t-1)$ | $P(t)$ |
|----------|--------|
| 50       | 65     |
| 65       | 78     |
| 78       | 90     |
| 90       | 110    |
| 110      | 130    |

**Tabla 6. Pares de valores para el ejemplo ilustrativo del modelo 3.**

La gráfica correspondiente a esta pareja de puntos presentada en la Tabla 6 para la determinación de los parámetros de modelo 3 de la planta, es la presentada en la Figura 3.



Considerando los datos presentados anteriormente, se identifica que la ecuación de la línea recta que representa mejor los puntos graficados es:

$$P(t) - 1.1147P(t - 1) = 7$$

Así entonces, para la determinación de parámetros del modelo lineal definido en la Resolución CREG 009 del 2003, se concluye que los parámetros a, b y UR, corresponden a los presentados en la Tabla 7.

| Modelo 3 | Bloques UR (MWh) |        |    | Bloques DR (MWh) |   |    |
|----------|------------------|--------|----|------------------|---|----|
|          | a                | b      | UR | c                | d | DR |
|          | 1                | 1.1147 | 7  |                  |   |    |

**Tabla 7. Parámetros de ejemplo ilustrativo del modelo 3.**

Por tanto, estos valores serían utilizados para modelar la rampa de aumento de la planta, desde su mínimo técnico hasta la capacidad efectiva neta, teniendo en cuenta que para un valor dado de  $P(t-1)$  mayor al mínimo técnico, el siguiente valor de la rampa  $P(t)$  en MWh, debe ser tomado del área sombreada en la gráfica presentada en la Figura 3.