

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/291333224>

Método para evaluar la eficiencia de los procesos productivos

Technical Report · February 2006

DOI: 10.13140/RG.2.1.4310.1206

READS

3

11 authors, including:



[Juan Cristóbal Birbuet](#)

Center for the Promotion of Sustainable Tec...

8 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

SEE PROFILE



**MÉTODO PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS Y
DE SUS OPERACIONES UNITARIAS MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO DE LOS CONSUMOS ESPECÍFICOS EN FUNCIÓN DE LOS
VOLÚMENES DE PRODUCCIÓN**

DOCUMENTO DE TRABAJO DT-1 PARA PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

Equipo Técnico del CPTS:

Carlos E. Arze Landivar, Director Ejecutivo; Cesín A. Curi S. Sub Director;
Juan Cristóbal Birbuet; Patricia Duran, Daysi Guamán Meza, Samuel Lora Rocha, Adalid Michel Espinosa,
Christian Romero Prieto, Antonio Ruiz Michel, Franz Velazco Quintanilla, Justo Zapata Quiroz.

Auspiciado por:



y



EMBAJADA
REAL DE
DINAMARCA

BOLIVIA, FEBRERO DE 2006

Resumen

El presente documento describe un método de análisis de la eficiencia de los procesos industriales en base al estudio e interpretación de los consumos específicos. El modelo está representado por una ecuación lineal inversa del consumo específico en función del volumen de producción. El consumo específico se desagrega en dos componentes: el consumo específico en régimen y el consumo total fuera de régimen. La aplicación del modelo utiliza un conjunto de criterios para identificar tendencias gráficas que representan el o los regímenes de producción en los que opera una empresa.

MÉTODO PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS Y DE SUS OPERACIONES UNITARIAS MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS CONSUMOS ESPECÍFICOS EN FUNCIÓN DE LOS VOLÚMENES DE PRODUCCIÓN (*)

Introducción

La industria manufacturera es un ámbito de transformación de valores. En el centro de todo está el proceso de producción, donde se combina tecnología y otros factores de producción con insumos productivos para obtener una cantidad determinada de producto final.

La eficiencia del proceso de producción depende de la relación que existe entre la cantidad de insumos que se utiliza y la de productos que se obtiene en un período de tiempo determinado. De esta manera, la eficiencia aumenta cuando un proceso es capaz de producir un mayor volumen de producción empleando la misma cantidad de insumos; o cuando utiliza una menor cantidad de insumos para producir un mismo volumen de producción. Por ello, una forma efectiva de evaluar la eficiencia de un proceso es analizar el consumo específico de los diferentes insumos que emplea. El consumo específico expresa la cantidad de un insumo cualquiera (por ejemplo, materia o energía) que se consume por unidad de producto manufacturado.

En el presente documento se desarrolla un método que permite este tipo de análisis en base a consumos específicos en función del volumen de producción. El método que se propone es útil para que las empresas puedan analizar, a partir de información básica, el comportamiento de sus operaciones unitarias, identificar el régimen de producción en el que operan y tener elementos de juicio para evaluar su eficiencia productiva.

El consumo de insumos dentro y fuera del régimen de producción

Para fines del presente documento, se define el proceso de producción como el conjunto de operaciones unitarias dispuestas de manera que permitan lograr un objetivo productivo. Una operación unitaria es un componente del proceso de producción que cumple una función específica, sin la cual el proceso no podría cumplir su función global.

En la Figura 1 se ilustra una operación unitaria sencilla, en la cual la materia prima se transforma en producto utilizando para ello energía térmica. En esta ilustración, la energía térmica se suministra mediante la combustión de gas natural (GN), el cual, junto con la materia prima, constituyen los insumos de entrada de la operación unitaria.

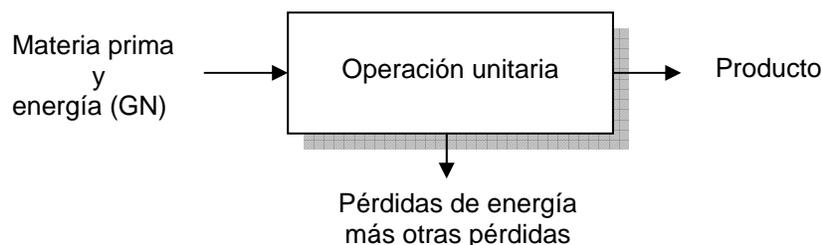


Figura 1. Diagrama de flujo de una operación unitaria sencilla, que transforma una determinada materia prima en producto, suministrando para ello una determinada cantidad de energía mediante la combustión de gas natural (GN).

(*) Vea la nota al final del presente documento, para informarse sobre el programa “CPTS-GRAF”, el cual es requerido para realizar las evaluaciones sobre eficiencia productiva.

Para analizar la eficiencia de una operación unitaria, es necesario determinar la cantidad consumida de un insumo dentro y fuera del régimen de producción. El régimen de producción de una operación unitaria, para fines del presente documento, se define como el conjunto de normas, procedimientos y parámetros de operación uniformes que se aplican estrictamente durante el periodo de tiempo en el que está ocurriendo la transformación de la materia prima en producto.

Por ejemplo, un horno de panificación requiere alcanzar una temperatura adecuada antes de iniciar la transformación de la masa de harina en pan. Para generar la energía necesaria que permita alcanzar esa temperatura, se requiere consumir una cantidad de combustible que está fuera del régimen de producción (es decir, se consume energía sin que se haya iniciado el horneado de un solo pan). El régimen de producción se inicia a partir del momento en que la masa es introducida en el horno, y concluye en el momento en el que el pan es retirado del horno. El consumo de combustible durante el tiempo de horneado corresponde a un consumo dentro del régimen de producción, mientras que el consumo adicional de combustible que ocurre desde que el pan es retirado del horno, hasta que una nueva cantidad de masa es introducida en el mismo, corresponde a un consumo fuera del régimen de producción.

En general, el consumo de un insumo durante el tiempo de intermitencia que ocurre entre lotes de producción (por ejemplo, en este caso, el tiempo transcurrido desde el retiro del pan horneado hasta la introducción de un nuevo lote de masa a ser horneada), corresponde a un consumo fuera del régimen de producción, ya que durante los tiempos de intermitencia, que pueden ser de distinta duración, no se está procesando producto alguno.

En este contexto, el consumo de un insumo, incluyendo las pérdidas del mismo, puede ocurrir tanto dentro como fuera del régimen de producción. Por ejemplo, si la operación unitaria ilustrada en la Figura 1 fuese el horneado de pan, y si la línea de suministro de GN del horno de pan presenta una fuga importante, entonces, durante el calentamiento inicial del horno, existirá una pérdida de GN que forma parte del consumo de GN fuera del régimen de producción. Asimismo, durante el horneado del pan, la misma causa que origina la fuga de GN hará que la pérdida de dicho combustible forme parte del consumo de GN dentro del régimen de producción.

Finalmente, si un determinado insumo se consume en actividades que no están relacionadas con la operación unitaria (por ejemplo, consumo de GN para la preparación del alimento diario de los trabajadores; y/o el GN que se consume en una caldera que suministra vapor a las duchas de los trabajadores; etc.), entonces dicho consumo también forma parte del consumo fuera del régimen de producción. Este tipo de consumos normalmente se registra como parte del consumo global de la empresa, ya que no existen medidores independientes que permitan cuantificar el consumo de dicho insumo relacionado solamente con la operación unitaria en cuestión.

Sobre estas bases conceptuales, es necesario definir las siguientes cantidades:

- Cdr = Cantidad de insumo que se consume dentro del régimen de producción, para producir una cantidad de producto, en un periodo de tiempo determinado (i.e. un mes).
= Cantidad de insumo que se consume durante la transformación de materia prima en producto + Cantidad de insumo que se pierde durante dicha transformación.
- Cfr = Cantidad de insumo consumida fuera del régimen de producción, en el mismo período de tiempo (i.e. un mes).
= Cantidad de insumo que se consume antes del inicio del régimen de producción + Cantidad de insumo que se pierde antes del inicio del régimen de producción + Cantidad de insumo que se consume durante los períodos de intermitencia productiva + Cantidad de insumo que se pierde durante dichos períodos de intermitencia + Cantidad de insumo que se consume y/o pierde en cualesquier otra actividad productiva y no productiva de una determinada empresa.

Por lo tanto, el consumo total (Ct) de un insumo, dentro y fuera del régimen de producción, en un periodo de tiempo determinado (i.e. un mes), está dado por la siguiente ecuación:

$$Ct = Cdr + Cfr \quad (1)$$

Cabe señalar que el consumo total, Ct, de un determinado insumo, es el que normalmente se registra en las empresas en forma periódica y, por lo general, en forma mensual. Por lo tanto, es frecuente encontrar registros del consumo de insumos expresados en cantidad de insumo por mes. De aquí en adelante, en este documento, se utilizará el mes como el período de registro de datos de consumo y de producción. La cantidad de los insumos puede estar expresada en unidades de masa, volumen, energía o número de unidades envasadas del insumo. Por ejemplo, si el insumo es energía eléctrica, Ct puede expresarse en kWh por mes; si es agua, en m³ por mes; si es GN, en mpc por mes; etc. Si el insumo tuviere la forma de tabletas de 100 g cada una, entonces Ct podría expresarse ya sea en kg por mes, o en número de tabletas de 100 g por mes.

Consumos específicos

Matemáticamente, el consumo específico (Ce) se define como el cociente entre la cantidad total, Ct, consumida de un insumo cualquiera (por ejemplo, materia prima, GN, agua, energía eléctrica, etc.) y el volumen de producción, Vp. El volumen de producción se define como la cantidad total de producto producido durante un periodo de tiempo determinado (se considera que dicha cantidad de producto se obtuvo empleando la cantidad total de insumo, Ct).

El término “volumen de producción” no necesariamente implica que la cantidad de producto producido deba expresarse en términos de un volumen. Las unidades del “volumen de producción” dependen de las unidades empleadas para especificar, por una parte, la cantidad de producto producido (por ejemplo, toneladas, metros cúbicos, número de unidades de producto envasado, etc.); y, por otra, el tiempo correspondiente al periodo de la producción (por ejemplo, hora, día, semana, mes o año).

Por lo tanto, el consumo específico, Ce, puede ser expresado mediante la siguiente relación:

$$Ce = Ct / Vp \quad (2)$$

Por ejemplo, si a partir de 40 kg de materia prima, 5 mpc de GN, 100 L de agua y 30 kWh de energía eléctrica se obtuvo 20 kg de producto, entonces se puede calcular los siguientes consumos específicos:

$$\begin{aligned} Ce \text{ (materia prima)} &= 40 \text{ kg materia prima} / 20 \text{ kg producto} \\ &= 2 \text{ kg materia prima} / \text{kg producto} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ce \text{ (GN)} &= 5 \text{ mpc GN} / 20 \text{ kg producto} \\ &= 0.25 \text{ mpc GN} / \text{kg producto} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ce \text{ (agua)} &= 100 \text{ L agua} / 20 \text{ kg producto} \\ &= 5 \text{ L agua} / \text{kg producto} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ce \text{ (energía eléctrica)} &= 30 \text{ kWh} / 20 \text{ kg producto} \\ &= 1.5 \text{ kWh} / \text{kg producto} \end{aligned}$$

Por lo general, en empresas del sector industrial manufacturero, con muy pocas excepciones, el consumo de insumos y los volúmenes de producción se registran en forma mensual debido a razones que son más de orden administrativo que de control operativo. Por lo tanto, las unidades del consumo de insumos generalmente se expresan en cantidad de insumo consumido por mes; y las unidades del volumen de producción se expresan en cantidad de producto producido por mes.

Retomando el ejemplo anterior, las unidades de los insumos y del producto, para un mes dado, se expresan de la siguiente manera:

Consumo (materia prima)	= 40 kg materia prima / mes
Consumo (GN)	= 5 mpc GN / mes
Consumo (agua)	= 100 L agua / mes
Consumo (energía eléctrica)	= 30 kWh / mes
Producción (producto)	= 20 kg producto / mes

El cálculo de los consumos específicos, a partir del consumo de insumos y de la producción de un producto en particular, arroja los mismos valores y unidades respectivas que los obtenidos a partir de los consumos mencionados en el primer ejemplo, debido a que la unidad [mes] del insumo se cancela con la unidad [mes] del producto, tal como se ilustra en el siguiente ejemplo:

$$\begin{aligned} C_e (\text{agua}) &= (100 \text{ L agua / mes}) / (20 \text{ kg producto / mes}) \\ &= 5 \text{ L agua / kg producto} \end{aligned}$$

Por lo tanto, los consumos específicos pueden ser calculados para cualquier período de producción (por ejemplo, diario, semanal, mensual o anual), dependiendo de las necesidades de información de la empresa. Si se requiere que el valor de un consumo específico sea más confiable, éste debe calcularse a partir de un número de datos periódicos (por ejemplo, mensuales) que correspondan a un período de producción más largo (por ejemplo, anual); caso contrario, dicho consumo específico puede calcularse, incluso en forma puntual, a partir de datos que correspondan a períodos de producción más cortos (por ejemplo, por minuto, hora, día o semana). En resumen, el valor de C_e es tanto más confiable cuantos más datos periódicos se tengan y más largo sea el período de producción para el cual se calcula dicho valor.

Por otra parte, el consumo específico es un parámetro muy útil para realizar el monitoreo de la eficiencia productiva. Un valor de este parámetro, medido dentro de un periodo de tiempo determinado, puede ser utilizado como un indicador de referencia, a fin de monitorear su variación en función del tiempo. Este monitoreo, realizado con métodos adecuados, permite la identificación de causas que originan problemas asociados a ineficiencias operativas, y es de gran ayuda para plantear soluciones.

Consideraciones similares son aplicables al cálculo de las descargas específicas (D_e), que también constituyen parámetros muy útiles para evaluar la eficiencia de los procesos productivos y de sus operaciones unitarias.

La descarga específica se define como el cociente entre la cantidad generada de un residuo cualquiera (agua, calor, sales disueltas, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), etc.) y el volumen de producción (V_p) que está asociado a la generación de esa cantidad de residuo. Las unidades de las descargas específicas se hallan a partir de las unidades del residuo producido durante un periodo determinado, divididas por las unidades del volumen de producción durante ese mismo periodo (cabe hacer notar que las unidades del periodo de producción se cancelan, y solamente quedan las unidades de las cantidades de residuo y de producto producidos).

A continuación, se dan algunos ejemplos de descargas específicas (D_e):

D_e (DBO)	= 32 kg DBO / kg producto
D_e (agua)	= 12 L agua / kg producto
D_e (mercurio)	= 300 mg Hg / kg producto

En todos los ejemplos anteriores, nótese que tanto los consumos específicos, como las descargas específicas, han sido cuantificados en relación a una cantidad de producto determinado. Cabe señalar que no solo un determinado producto, sino también cualquier insumo e, incluso, un determinado residuo, pueden ser utilizados para calcular los consumos específicos o las descargas específicas. Sea cual fuere el insumo, producto o residuo elegido, éste debe ser siempre el mismo, a fin de poder contar con valores

de referencia válidos por tiempo indefinido. Sin embargo, en el presente documento, se utilizará solamente el volumen de producción para el cálculo de los consumos específicos.

Modelo del comportamiento del consumo específico en función del volumen de producción

El CPTS ha desarrollado un modelo que permite representar el comportamiento del consumo específico de un insumo cualquiera en función del volumen de producción. Los resultados de la aplicación de este modelo facilitan, en gran medida, la evaluación de la eficiencia de los procesos productivos y de sus operaciones unitarias, tanto dentro como fuera del régimen de producción.

En general, es lógico suponer que a mayor volumen de producción mayor será la cantidad total consumida de un insumo cualquiera. Es también lógico suponer que, para un régimen de producción determinado, en el que existen pérdidas de un insumo, a mayor volumen de producción, mayor será la cantidad total de las pérdidas de dicho insumo. Sin embargo, el conocimiento de la cantidad total consumida de un insumo, o la cantidad total de las pérdidas del mismo, si bien son fundamentales para realizar balances de masa, no son suficientes para identificar las causas de ciertas ineficiencias que ocurren ya sea dentro del régimen de producción, fuera de dicho régimen, o en ambos.

En este sentido, es de fundamental importancia determinar qué cantidad del insumo se consumió dentro del régimen de producción, y qué cantidad se consumió fuera de dicho régimen, incluyendo en cada caso las pérdidas del insumo correspondientes. Para el efecto, la aplicación del modelo permite determinar las cantidades de un insumo consumidas dentro y fuera del régimen de producción. Este modelo está basado en una ecuación lineal inversa, que se deriva a partir de la ecuación (1), al dividir todos sus términos por el volumen de producción, V_p :

$$C_t / V_p = C_{dr} / V_p + C_{fr} / V_p \quad (3)$$

El cociente (C_{dr} / V_p) que aparece en la ecuación 3, representa el consumo específico del insumo dentro del régimen de producción y será representado por el término C_{er} . Es decir:

$$C_{er} = C_{dr} / V_p \quad (4)$$

Introduciendo el término C_e de la ecuación (2) y el término C_{er} de la ecuación (4) en la ecuación (3), se obtiene la ecuación lineal inversa, que representa el modelo antes mencionado, y que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$C_e = C_{er} + C_{fr} / V_p \quad (5)$$

Este modelo se interpreta de la siguiente manera. El consumo específico de un insumo dado está compuesto por dos términos, el primero es el consumo específico en régimen (C_{er}) y, el segundo, el cociente que se obtiene de dividir el consumo total fuera de régimen (C_{fr}) entre el volumen de producción (V_p). El consumo específico en régimen, C_{er} , representa la proporcionalidad que existe entre el consumo de un insumo y el volumen de producción, mientras que el consumo fuera de régimen, C_{fr} , es el consumo del insumo que no es proporcional al volumen de producción. Por lo tanto, para un C_{er} y C_{fr} dados, el valor de C_e disminuye a medida que V_p aumenta; y viceversa.

Para aplicar este modelo, primero se grafica los datos del consumo específico (C_e) en función del volumen de producción (V_p) y, segundo, se realiza un ajuste lineal de dichos datos con la ecuación (5), lo que permite hallar los valores de C_{er} y de C_{fr} para un determinado régimen de producción. Dado que los datos graficados pueden llegar a ser bastante dispersos y, por ende, la gráfica puede ser bastante compleja, el CPTS ha desarrollado ciertos criterios que permiten identificar los regímenes de producción existentes, a fin de hallar los valores de C_{er} y C_{fr} que corresponden a cada uno de esos regímenes. Sin embargo, estos criterios son descritos más adelante, ya que primero es necesario explicar el modelo en su forma más simple y pura.

Para tal efecto, en el Cuadro 1 se presenta datos de consumo y de producción correspondientes a dos regímenes de producción imaginarios, cada uno de los cuales tiene dos consumos distintos fuera de régimen. Es decir, los datos del consumo total (Ct) fueron obtenidos a partir de valores imaginarios de Cer, Cfr y Vp, con el fin de calcular los correspondientes valores de Ce en función de Vp, para luego, mediante el ajuste lineal con la ecuación (5), volver a obtener los datos de Cer y Cfr de partida. La realización de este ejercicio permite comprender la manera mediante la cual se obtienen valores de Cer y Cfr desconocidos a partir de datos conocidos de Ce y de Vp.

Cuadro 1. Datos calculados del consumo total (Ct) de un insumo cualquiera por mes (en litros/mes), a partir del consumo específico en régimen (Cer), del consumo fuera de régimen (Cfr) y del volumen de producción (Vp), correspondientes a dos regímenes de producción imaginarios.

Régimen de producción	Mes	Valores imaginarios			Ct [L/mes] (parámetro calculado)
		Cer [L/t]	Cfr [L/mes]	Vp [t/mes]	
Régimen 1.a	Mes 1	3.2	450	100	770
	Mes 2			140	898
	Mes 3			170	994
	Mes 4			230	1,186
Régimen 1.b	Mes 5	3.2	700	100	1,020
	Mes 6			140	1,148
	Mes 7			170	1,244
	Mes 8			230	1,436
Régimen 2.a	Mes 9	5.4	450	100	990
	Mes 10			140	1,206
	Mes 11			170	1,368
	Mes 12			230	1,692
Régimen 2.b	Mes 13	5.4	700	100	1,240
	Mes 14			140	1,456
	Mes 15			170	1,618
	Mes 16			230	1,942

Los dos casos, 1.a y 1.b, del régimen 1, mostrados en el Cuadro 1, pertenecen al mismo régimen de producción debido a que sus valores de Cer son idénticos entre sí. La diferencia está en que sus valores de Cfr son distintos (el valor de Cfr puede variar por diversos motivos; por ejemplo, el consumo de agua en duchas del personal, o el consumo de GN para propósitos de calefacción de ambientes, los cuales son consumos fuera del régimen de producción, pueden variar en forma estacional).

Similar situación se presenta para los dos casos del régimen 2 (2.a y 2.b). Este régimen tiene un consumo específico por unidad de producción más alto que el del régimen 1. Existen varias razones por las cuales se observan dos o más regímenes dentro de un mismo proceso productivo. Una de ellas está asociada con la modificación, aumento o disminución del número de operaciones unitarias que intervienen en el proceso de producción. Por ejemplo, en un matadero, el sistema de refrigeración de la carne faenada no se utiliza durante los meses de mediana y baja producción, debido a que los clientes del matadero retiran la carne faenada conforme el matadero la procesa; sin embargo, en meses de alta producción, el matadero se ve obligado a hacer funcionar sus frigoríficos, lo cual demanda, por ejemplo, mayor consumo específico de energía eléctrica. Otra de las razones por las cuales se observan dos o más regímenes dentro de un mismo proceso productivo, está asociada con la distinta calidad o naturaleza de la materia prima o de los insumos utilizados para la producción. Por ejemplo, durante una operación de secado de materia prima, en la que se utiliza GN como combustible del horno de secado, el consumo específico de GN en régimen cambia en función de la humedad inicial de la materia prima. Una tercera razón está relacionada con el aumento o la disminución de la eficiencia productiva que haya tenido una empresa (este aspecto será discutido en la penúltima Sección de este documento).

En el Cuadro 2 se presenta valores de consumos específicos (Ce), calculados a partir de los datos del consumo total (Ct) y del volumen de producción (Vp) mostrados en el Cuadro 1. El cálculo de Ce se realiza utilizando la ecuación (2), a partir de los datos de Ct y de Vp. En la práctica, los datos de Ct y Vp

son los que las empresas normalmente registran en forma periódica (por ejemplo, mensual). A partir de estos datos, el modelo del CPTS se aplica para hallar los valores de C_{er} y de C_{fr} , ajustando la ecuación (5) con los puntos de una gráfica de valores de C_e en función de V_p .

Cuadro 2. Cálculo de consumos específicos (C_e) a partir de los datos imaginarios del consumo total (C_t) y del volumen de producción (V_p), correspondientes a los regímenes de producción del Cuadro 1.

Régimen de producción	Mes	Valores imaginarios del Cuadro 1		C_e [L / t]
		C_t [L/mes]	V_p [t/mes]	
Régimen 1.a	Mes 1	770	100	7.70
	Mes 2	898	140	6.41
	Mes 3	994	170	5.85
	Mes 4	1,186	230	5.16
Régimen 1.b	Mes 5	1,020	100	10.20
	Mes 6	1,148	140	8.20
	Mes 7	1,244	170	7.32
	Mes 8	1,436	230	6.24
Régimen 2.a	Mes 9	990	100	9.90
	Mes 10	1,206	140	8.61
	Mes 11	1,368	170	8.05
	Mes 12	1,692	230	7.36
Régimen 2.b	Mes 13	1,240	100	12.40
	Mes 14	1,456	140	10.40
	Mes 15	1,618	170	9.52
	Mes 16	1,942	230	8.44

En la Figura 2 se muestra una gráfica de C_e en función de V_p con datos del Cuadro 2. Cada punto de la gráfica corresponde a un determinado valor de V_p (eje de las abscisas) y a uno de C_e (eje de las ordenadas); y ambos valores pertenecen a uno de los dos casos de cada uno de los dos regímenes de producción.

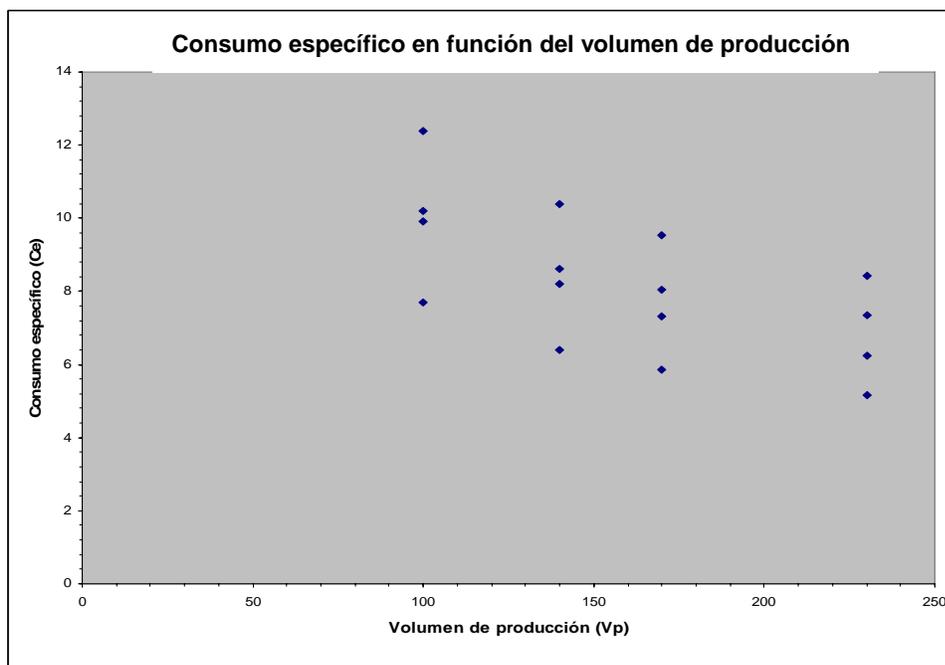


Figura 2. Gráfica del comportamiento del consumo específico (C_e) en función del volumen de producción (V_p), a partir de datos del Cuadro 2.

En la gráfica de la Figura 3 se muestra el ajuste lineal de los puntos de la Figura 2, utilizando para ello la ecuación (5). Con estos datos se identifican cuatro tendencias lineales inversas (en adelante, tendencias lineales o simplemente tendencias), que representan a cada caso de cada régimen de producción descrito en el Cuadro 1. En la misma gráfica se muestra la ecuación (5) con los respectivos valores de C_{er} y C_{fr} de cada una de las cuatro tendencias lineales. Debido a que estos valores reproducen en forma exacta los valores imaginarios que fueron utilizados para hallar los valores de C_t y de C_e del Cuadro 2, demuestra que el modelo permite hallar los valores correctos de C_{er} y de C_{fr} a partir de los datos de C_e y de V_p que registran las empresas.

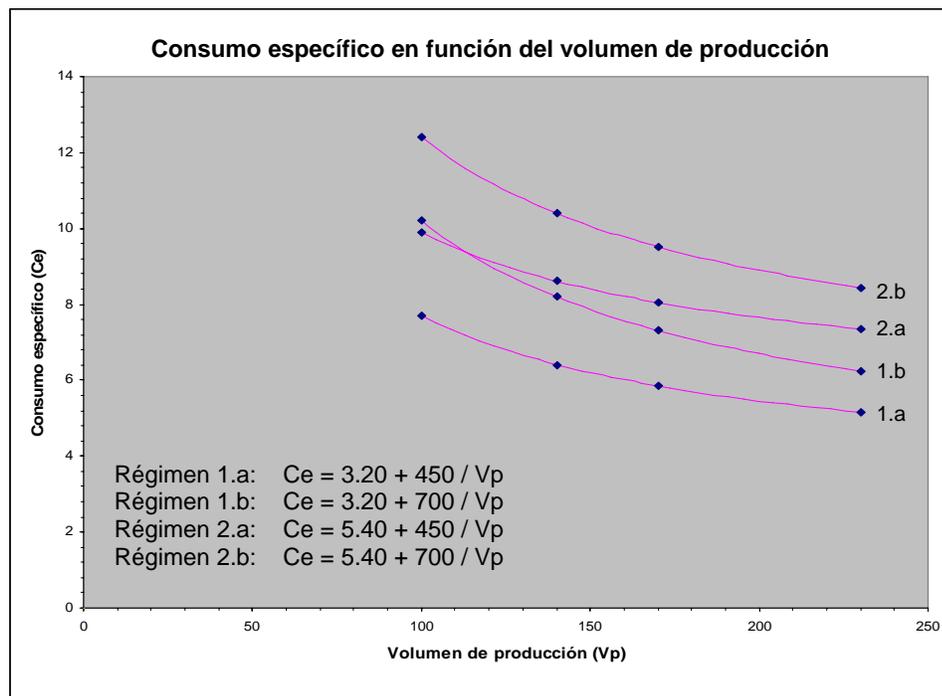


Figura 3. Tendencias lineales ajustadas con la ecuación (5), correspondientes a los dos casos de cada uno de los dos regímenes de producción descritos en el Cuadro 1. El valor de los coeficientes de cada ecuación reproduce los valores de C_{er} y C_{fr} del Cuadro 1.

El coeficiente de correlación lineal de las cuatro tendencias es, por supuesto, igual a la unidad, debido a que se ha partido de valores exactos de C_{er} y de C_{fr} para calcular los valores de C_t presentados en el Cuadro 1. En la práctica, de acuerdo a los datos de varias empresas examinados por el CPTS, es frecuente encontrar tendencias lineales cuyos coeficientes cuadráticos de correlación (es decir, R^2) tienen un valor superior a cinco dígitos decimales con valor 9 (i.e., 0.999997).

Un análisis de la forma de las tendencias lineales mostradas en la gráfica de la Figura 3, permite sacar las siguientes conclusiones:

- Las tendencias lineales que pertenecen a un mismo régimen de producción (por ejemplo, la 1.a y la 1.b) tienen el mismo valor de C_{er} , pero distinto C_{fr} ; estas tendencias son convergentes, debido a que, conforme se incrementa V_p , ambas tienden continuamente hacia un mismo valor de C_{er} .
- Las tendencias lineales que pertenecen a distintos regímenes de producción tienen distinto valor de C_{er} . Cuando estas tendencias tienen el mismo valor de C_{fr} (por ejemplo, la 1.a y la 2.a), éstas son paralelas entre sí, debido a que, para cualquier valor de V_p , la magnitud de su separación es siempre la diferencia de sus valores de C_{er} ; y cuando estas tendencias tienen distinto valor de C_{fr} (por ejemplo, la 1.b y la 2.a), éstas no son paralelas entre sí, pero tienden a serlo conforme V_p se incrementa.

Tipos de tendencias lineales y criterios para la identificación de regímenes de producción

En base a los resultados del modelo descrito en la Sección anterior, en la presente Sección se describe tres tipos de tendencias lineales que se utilizan para diseñar criterios confiables de identificación de regímenes de producción, a partir de un grupo de datos de consumos específicos (C_e) que se grafican en función del volumen de producción (V_p).

Sin embargo, antes de describir los tres tipos de tendencias lineales mencionados, es necesario primero considerar un caso en el que existe una única tendencia lineal que, si bien no es muy útil para el propósito de diseñar los criterios mencionados en el párrafo anterior, su análisis ayuda a comprender mejor varios aspectos del modelo inverso en relación al comportamiento del consumo de insumos en función del volumen de producción.

A veces ocurre que todos los puntos de la gráfica de C_e en función de V_p caen dentro de una misma tendencia lineal. Esto ocurre cuando todos los puntos pertenecen a un mismo régimen de producción, por lo que existe un único valor de C_{er} , y además existe un único valor de C_{fr} . Esto es, en realidad, un comportamiento sistemático del régimen de producción, ya que implica que:

- las operaciones unitarias del proceso productivo se realizan, mes a mes, siempre bajo las mismas normas y bajo los mismos procedimientos, y se establece siempre los mismos parámetros de operación;
- la calidad de los insumos utilizados es siempre la misma, y que las operaciones unitarias están libres de influencias externas (por ejemplo, influencias climáticas, temperatura y humedad ambiental, entre otras);
- en el caso de empresas que fabrican varios productos, los datos de consumo y de producción se miden y se registran por tipo de producto fabricado. Esta forma de registro es importante, debido a que es frecuente que en la fabricación de productos diferentes, se consuman los mismos insumos (por ejemplo, agua y energía eléctrica) pero no se los registre en forma separada por tipo de producto. Debido a que la naturaleza de los productos es diferente, por lo general, la magnitud del consumo de estos insumos también lo será. Entonces, si se mide globalmente el consumo de un insumo común a varios productos, se generarán varias tendencias en función de las proporciones en las que se produzca uno u otro producto. Solo si la empresa fabricase sus productos siempre en la misma proporción, se podría obtener una sola tendencia a partir de datos medidos globalmente. Sin embargo, es muy poco probable que esto ocurra.

Para hallar una sola tendencia lineal, las tres condiciones antes señaladas se deben cumplir. Este comportamiento sistemático no implica, sin embargo, que la operación unitaria sea eficiente en términos de la eficacia de la tecnología utilizada (el concepto de eficacia se discute en la Sección “Evaluación de la eficiencia productiva mediante el modelo lineal inverso”).

Adicionalmente, es importante señalar que, para facilitar la identificación de tendencias, es conveniente que la empresa haga un esfuerzo por medir en forma separada el consumo global asociado solo a un proceso productivo o a una operación unitaria, excluyendo el consumo que tiene lugar en actividades ajenas a dicho proceso u operación unitaria. Esto es particularmente útil en el caso de insumos como el agua y la energía, cuyos consumos fuera de régimen tienen lugar tanto como parte de la producción (consumos durante tiempos de intermitencia, lavado de máquinas, etc.), como en otras actividades ajenas al propio proceso (administración, cocina, limpieza, riego de jardines, etc.).

De acuerdo con la experiencia del CPTS, no es frecuente encontrar una empresa productiva que logre alcanzar el comportamiento sistemático descrito en el párrafo anterior. Un razonamiento sencillo que justifica esta afirmación, es que las empresas, con contadas excepciones, carecen de medidores individuales que les permita registrar datos relacionados únicamente con el proceso productivo o con sus operaciones unitarias. Por ello, es común que las mediciones del consumo de insumos incluyan el consumo aleatorio de cantidades significativas de insumos en actividades ajenas a la producción. No obstante, se ha observado en algunas empresas que, a pesar de que sus registros de consumo y de producción son globales, las gráficas de C_e en función de V_p muestran una única tendencia lineal, con un

coeficiente de correlación lineal muy alto. Una posible explicación de este comportamiento, que aparentemente es sistemático, es que, si bien el consumo diario fuera del régimen de producción de un determinado insumo es variable, el consumo promedio mensual resulta ser bastante constante durante varios meses consecutivos.

Otro caso extremo, que es opuesto al del régimen de producción sistemático que se acaba de describir, es el que se observa cuando los datos de C_e en función de V_p no demuestran pertenecer a régimen de producción alguno. Esto implica que, a partir de una gráfica de C_e en función de V_p , no es posible identificar tendencia lineal alguna. Este comportamiento, que denota un carácter totalmente aleatorio y opuesto al de un régimen de producción sistemático, implica que:

- las operaciones unitarias del proceso productivo se realizan sin seguir normas ni procedimientos (escritos o no), y/o que no se aplican parámetros de operación uniformes;
- la calidad de los insumos utilizados no es uniforme, y/o que las operaciones unitarias son muy sensibles a las influencias externas (por ejemplo, temperatura, humedad u otro tipo de influencias estacionales);
- los datos de consumo y de producción de un proceso dado, no se miden de manera separada de otros procesos productivos y de otras actividades que consumen los mismos insumos, o que los datos no han sido correctamente sistematizados.

En resumen, implica que las operaciones se realizan sin control alguno, e incluye la posibilidad de que exista un porcentaje significativo de pérdidas aleatorias de insumos y/o de productos.

Entre los dos regímenes de producción extremos (el sistemático y el aleatorio), descritos en los párrafos precedentes, existen regímenes de producción intermedios, que resultan de una mezcla de comportamientos de tipo sistemático y de tipo aleatorio, que podrían dar lugar a una diversidad de tendencias lineales, debido a que tanto sus valores de C_e , como sus valores de C_f , pueden ser iguales, similares o significativamente distintos entre sí. Por lo tanto, en la práctica, se demuestra que existe un número reducido de regímenes de producción intermedios, que tienen su origen en tres tipos de comportamientos intermedios bastante bien definidos, y que se caracterizan por tener un comportamiento sistemático o cuasi sistemático en régimen, y un comportamiento aleatorio fuera de régimen.

Un comportamiento cuasi sistemático implica que en un determinado régimen de producción existen pequeñas diferencias que no son de carácter tecnológico ni operativo (por ejemplo, pueden estar relacionadas con diferencias en la calidad de las materias primas, o en el efecto que tiene la humedad o la temperatura ambiente sobre un proceso u operación unitaria), por lo que sus valores de C_e difieren en forma no muy significativa (este aspecto será discutido más adelante con mayor detalle).

Los tres tipos de regímenes de producción intermedios, identificados por el CPTS, son:

- Un primer tipo de régimen de producción intermedio, que fue observado con mayor frecuencia en el sector industrial manufacturero de Bolivia, es el que corresponde a un único régimen de producción, en el que existe una mezcla de un comportamiento sistemático en régimen y de un comportamiento aleatorio fuera de régimen. Esta mezcla de comportamientos distintos en régimen y fuera de régimen genera tendencias lineales que, en general, poseen un mismo valor de C_e y distintos valores de C_f .
- Un segundo tipo de régimen de producción intermedio, que fue observado con mucha menor frecuencia que la del primer tipo, es el que corresponde a una mezcla de dos o más regímenes de producción, en los que además puede haber una mezcla de comportamientos sistemáticos en régimen y aleatorios fuera de régimen. Este tipo de régimen de producción intermedio genera tendencias lineales que se caracterizan por tener valores de C_e distintos, independientemente de cuán diferentes o iguales sean sus valores de C_f . Nótese que, a pesar de existir dos o más valores de C_e , correspondientes a dos o más regímenes de producción, cada uno de ellos debe tener un comportamiento sistemático en régimen. Caso contrario, las tendencias lineales que resultarían corresponden a las del régimen de producción aleatorio (uno de los dos extremos antes señalado).

- Un tercer tipo de régimen de producción intermedio, que es una variante del primer tipo, y que fue observado con bastante frecuencia, aunque con menor frecuencia que el primero, es el que corresponde a un único régimen de producción, pero en el que existe una mezcla de un comportamiento cuasi sistemático en régimen y de un comportamiento aleatorio fuera de régimen. Este tipo de régimen de producción intermedio genera tendencias lineales que se caracterizan por tener valores de Cer que difieren en forma no muy significativa, y por tener distintos valores de Cfr.

Es importante aclarar que la diferencia entre el tercer y segundo tipos de regímenes de producción intermedios no está en la magnitud de las diferencias que existen entre los valores de Cer, sino más bien en el número de regímenes de producción asociados al registro de datos de consumo y de producción. Es decir, el tercer tipo corresponde a un único régimen de producción, en el que se tiene un comportamiento cuasi sistemático en régimen, que es el que genera las pequeñas diferencias entre los valores de Cer; mientras que el segundo tipo corresponde a una mezcla de dos o más regímenes de producción, que es la causa por la cual se obtienen diferentes valores de Cer.

Por otra parte, cabe reiterar que estos tres tipos de regímenes de producción intermedios deben corresponder, necesariamente, a la mezcla de un comportamiento sistemático en régimen (o a uno cuasi sistemático) y de un comportamiento aleatorio fuera de régimen. Si el comportamiento en régimen fuera también de carácter aleatorio, entonces no se observaría tendencia lineal alguna en la gráfica de Ce en función de Vp, ya que dicha gráfica correspondería al régimen extremo de producción aleatorio antes mencionado.

Estos tres tipos de regímenes de producción intermedios dan lugar a tendencias lineales que también pueden ser clasificadas en tres tipos, los cuales son útiles para establecer criterios que se aplican para identificar regímenes de producción a partir de datos de Ce graficados en función de Vp. Los tres tipos de tendencias lineales que a continuación se describen, están en correspondencia con los tres tipos de regímenes de producción intermedios antes señalados:

Tipo 1. Tendencias lineales que tienen el mismo valor de Cer, pero distinto valor de Cfr. Es decir, son tendencias lineales que pertenecen a un mismo régimen de producción, pero tienen distintos consumos fuera de dicho régimen (ver descripción del primer tipo de régimen de producción intermedio). Este tipo de tendencias lineales puede ilustrarse mediante las tendencias lineales 1.a y 1.b (o 2.a y 2.b) mostradas en la gráfica de la Figura 3.

Tipo 2. Tendencias lineales que tienen distinto valor de Cer, y pueden o no tener el mismo valor de Cfr. Es decir, a pesar de que puedan tener el mismo Cfr, pertenecen a distintos regímenes de producción (ver descripción del segundo tipo de régimen de producción intermedio). Este tipo de tendencias lineales puede ilustrarse mediante las tendencias lineales 1.a y 2.a mostradas en la gráfica de la Figura 3 (o mediante las tendencias lineales 1.b y 2.b de la misma gráfica).

Tipo 3. Tendencias lineales que tienen distintos valores de Cer y de Cfr, excepto que la diferencia entre los valores de Cer no es muy significativa. Es decir, son tendencias lineales que, en realidad, pertenecen a un mismo régimen de producción, pero, por pequeñas diferencias en el régimen operativo, hace que dichas tendencias tengan valores de Cer un poco distintos entre sí (ver descripción del tercer tipo de régimen de producción intermedio). Este tipo de tendencias lineales son parecidas en forma a las tendencias lineales 1.a y 2.b (o 1.b y 2.a) ilustradas en la gráfica de la Figura 3 (nótese que éstas no son estrictamente del Tipo 3, debido a que sus valores de Cer no corresponden a un único régimen de producción).

Tendencias lineales del Tipo 1

En las Figuras 4 y 5 se ilustra gráficas del consumo específico en función del volumen de producción para los insumos energía eléctrica y gas natural, respectivamente. Los datos de Ce y de Vp son reales y fueron obtenidos por el CPTS en una planta beneficiadora de quinua y en una planta de producción de mezcla asfáltica, ambos durante diagnósticos de producción más limpia. Las tendencias lineales que se observa son del Tipo 1.

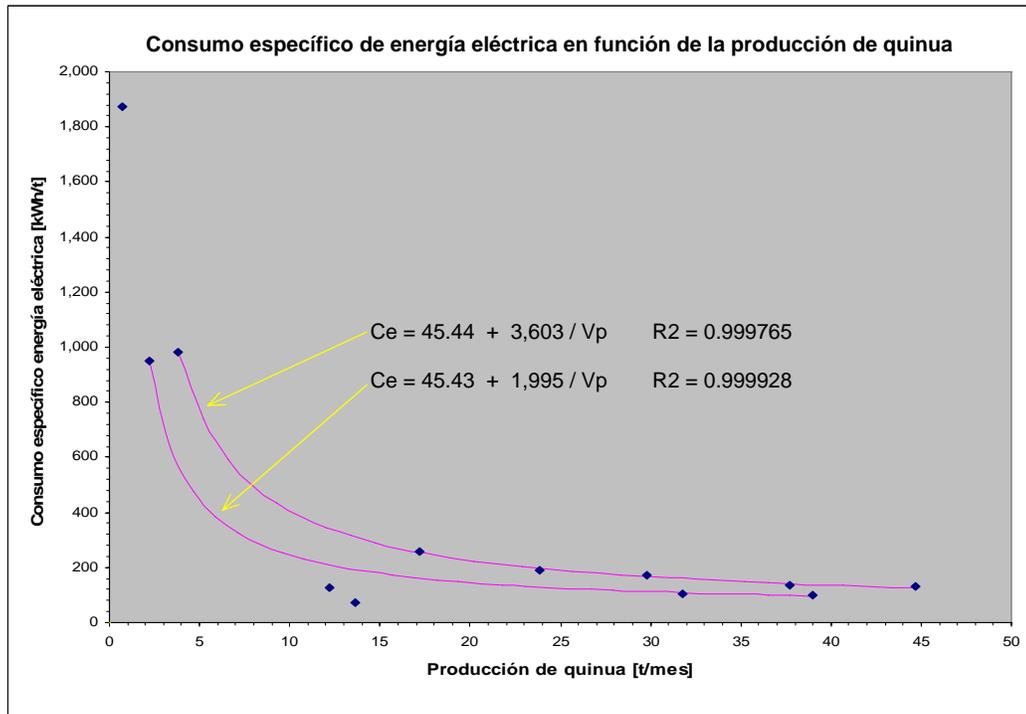


Figura 4. Gráfica del consumo específico (C_e) de energía eléctrica en función de V_p de quinua, con dos tendencias lineales ajustadas con la ecuación (5), cada una con un mismo valor de C_{er} , pero diferente valor de C_{fr} (Tipo 1).

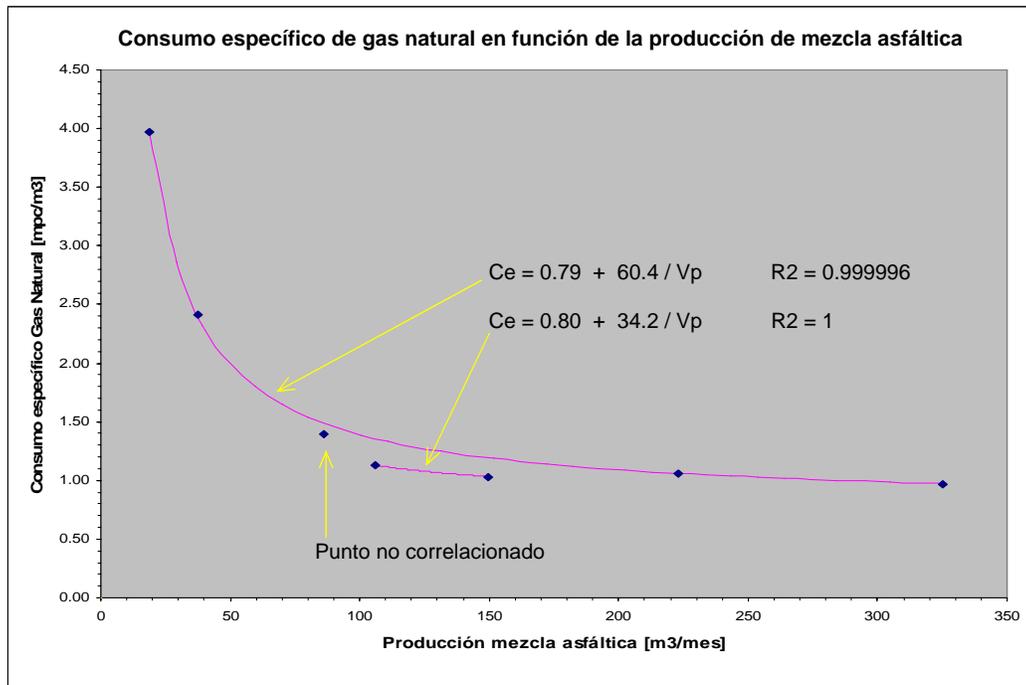


Figura 5. Gráfica del consumo específico (C_e) de gas natural en función de V_p de mezcla asfáltica, con dos tendencias lineales ajustadas con la ecuación (5), cada una con un mismo valor de C_{er} , pero diferente valor de C_{fr} (Tipo 1).

Cada gráfica posee dos tendencias lineales que pertenecen a un mismo régimen de producción (es decir, las dos tendencias lineales mostradas en cada gráfica tienen prácticamente el mismo valor de Cer, pero se distinguen por su distinto valor de Cfr).

En la gráfica de la Figura 4 existen tres puntos que no están correlacionados con ninguna de las dos tendencias lineales identificadas. Sin embargo, esto no implica que uno o más de esos tres puntos no pertenezcan al mismo régimen de producción. Lo que ocurre es que no se cuenta con datos suficientes de Ce y Vp que permitan ajustar esos puntos y encontrar su tendencia lineal. Si se tuviera más puntos, es posible que se encuentre que esos tres puntos forman parte de otras tres tendencias lineales, con un mismo valor de Cer, pero distinto valor de Cfr. Las mismas consideraciones son válidas para el punto no correlacionado en la gráfica de la Figura 5.

Como ya fue mencionado, un régimen de producción queda establecido cuando se identifica tendencias lineales que tienen el mismo valor de Cer, a partir de una gráfica de Ce en función de Vp. Para identificar tendencias lineales correspondientes a un mismo régimen de producción, es necesario examinar los criterios relacionados con la confiabilidad de la identificación de tendencias lineales que tienen un mismo valor de Cer. De acuerdo con la experiencia del CPTS, la confiabilidad del valor de Cer correspondiente a un determinado régimen de producción, es tanto mayor cuanto más se satisfaga los siguientes criterios aplicables a la gráfica de Ce en función de Vp:

- **Primer criterio.** Existen por lo menos dos tendencias lineales identificadas y cada una de ellas contiene el mayor número de puntos posible de los existentes o disponibles en la gráfica. El número de puntos no correlacionados no es parte de este criterio.
- **Segundo criterio.** Las dos o más tendencias lineales identificadas tienen el mismo valor de Cer (en la práctica, se espera que los valores de Cer sean muy próximos entre si).
- **Tercer criterio.** La magnitud de los coeficientes de correlación de cada una de las tendencias lineales es relativamente alta. Este criterio es aplicable solo si se cumplen los dos criterios anteriores.

Cuando se satisfacen los dos primeros criterios, queda establecida la existencia de un único régimen de producción, ya que las dos o más tendencias lineales tienen el mismo valor de Cer. Sobre esta base, el tercer criterio es recién aplicable, haciendo que el valor de Cer sea tanto más confiable cuanto más alto sea el coeficiente de correlación de cada tendencia lineal identificada.

La confiabilidad del valor de Cer no debe confundirse con la confiabilidad de cada tendencia lineal en sí misma, ya que ésta está básicamente determinada por el número de puntos y por el coeficiente de correlación lineal de dichos puntos que conforman una determinada tendencia. Un coeficiente de correlación alto entre los puntos de una tendencia lineal no garantiza que el valor individual de Cer de dicha tendencia sea confiable. Lo que proporciona confiabilidad al valor de Cer de un régimen de producción, es que las dos o más tendencias lineales identificadas tengan el mismo valor de Cer. Por ejemplo, si dos tendencias lineales no tuvieran el mismo valor de Cer, entonces ninguna de las dos tendencias es confiable para identificar un determinado régimen de producción, aún cuando cada tendencia lineal esté conformada por un gran número de puntos y la magnitud de los coeficientes de correlación de dichos puntos sea muy alta. En este ejemplo, las tendencias individuales son confiables en sí mismas, pero no identifican en forma confiable a un determinado régimen de producción (ver la explicación más adelante sobre la falta de confiabilidad de los valores de Cer asociados a la mezcla de dos o más regímenes de producción que generan tendencias lineales del Tipo 2).

La aplicación de los criterios mencionados se ilustra mediante las Figuras 4, 5 y 6. En esta última Figura, donde se grafica el consumo específico de GN en función del volumen de producción en una curtiembre, se identificaron dos tendencias lineales: la primera (de abajo hacia arriba de la gráfica), formada por tres puntos; y la segunda, formada por cinco puntos. Existen además cuatro puntos no correlacionados. Cabe remarcar que la segunda tendencia lineal, la cual está conformada por cinco puntos altamente correlacionados (coeficiente de correlación cuadrático con tres dígitos decimales igual a 9), si bien incrementa la confiabilidad de la tendencia lineal en sí misma, no es un criterio suficiente para afirmar que

su valor de C_{er} es válido y que corresponde a un determinado régimen de producción. La confiabilidad se da por el hecho que existe otra tendencia lineal con el mismo valor de C_{er} ; y los cinco puntos altamente correlacionados de la segunda tendencia lineal, lo único que hace es incrementar dicha confiabilidad.

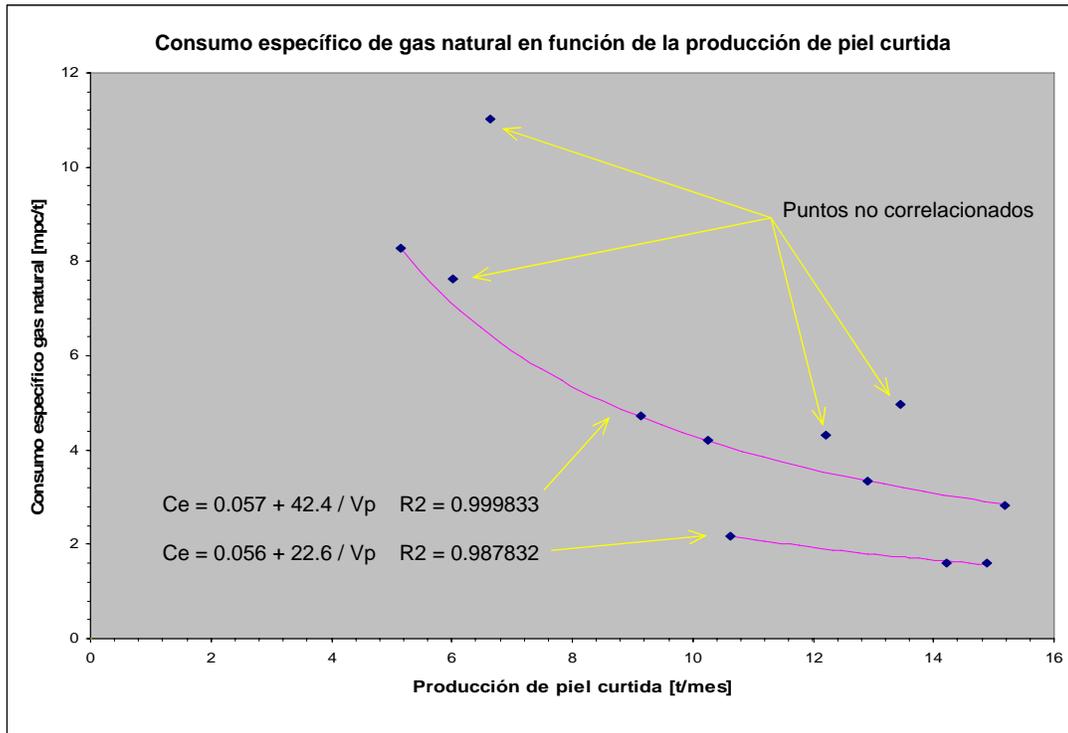


Figura 6. Gráfica con dos tendencias lineales, ajustadas con la ecuación (5), cada una de las cuales tiene un mismo valor de C_{er} , pero diferente C_{fr} (Tipo 1).

En general, una confiabilidad aceptable del valor de C_{er} se obtiene cuando en la gráfica se identifica dos tendencias lineales con el mismo valor de C_{er} , donde una de las tendencias está conformada por un mínimo de tres puntos, con un coeficiente de correlación relativamente alto (por lo menos dos dígitos decimales con valor nueve), y la otra tendencia está conformada por un mínimo de dos puntos. Cabe aclarar que el coeficiente de correlación de solo dos puntos es siempre la unidad, por lo que no tiene utilidad alguna en la determinación de la confiabilidad del régimen de producción identificado.

Aplicando los tres criterios señalados a las tendencias lineales identificadas en las Figuras 4, 5 y 6, se concluye que sus respectivos valores de C_{er} son confiables. Como se observa, en cada gráfica existen dos tendencias lineales, cada una con valores de C_{er} casi idénticos y con coeficientes de correlación relativamente altos. Se puede observar, además, que una de las dos tendencias lineales está conformada por más de tres puntos, y la otra con dos o más puntos.

Sobre esta base, para obtener el valor de C_{er} correspondiente al régimen de producción asociado a las tendencias lineales identificadas, es admisible ya sea promediar sus valores de C_{er} o utilizar el valor de C_{er} correspondiente a la tendencia lineal más confiable, según los siguientes criterios:

- Cuando las tendencias lineales identificadas poseen igual o similar confiabilidad, entonces se utiliza el promedio aritmético de los valores de C_{er} de todas las tendencias lineales identificadas. Por ejemplo, en la gráfica de la Figura 4, las dos tendencias son altamente confiables, por lo que sus valores de C_{er} pueden ser promediados: $C_{er} \text{ promedio} = (45.44 + 45.43) / 2 = 45.435 \text{ kWh/t}$. Sin embargo, este promedio debe ser redondeado a cuatro cifras significativas: $C_{er} = 45.44 \text{ kWh/t}$ (en general, se debe redondear de acuerdo al número de cifras significativas empleado). Este valor de C_{er} representa el consumo específico en régimen de energía eléctrica por tonelada de quinua procesada.

- Cuando las tendencias lineales identificadas no poseen igual o similar confiabilidad, entonces se utiliza el valor de Cer correspondiente a la tendencia lineal de mayor confiabilidad. Por ejemplo, en las Figuras 5 y 6, la segunda tendencia de cada gráfica (siempre de abajo hacia arriba) es la que posee mayor confiabilidad, por lo que los valores de Cer a ser adoptados son 0.79 mpc/m^3 y 0.057 mpc/t , respectivamente. Estos dos valores representan el consumo específico en régimen de GN por metro cúbico de mezcla asfáltica y por tonelada de piel curtida, respectivamente.

Una vez hallado un valor de Cer confiable, que corresponde a un determinado régimen de producción, se procede a planificar mediciones puntuales para verificar la validez de dicho valor en planta. Si se verifica la validez del valor de Cer en planta, entonces los diferentes valores de Cfr, que están asociados a las tendencias lineales con un mismo valor de Cer, quedan también validados. Cabe señalar que el consumo específico en régimen (Cer) es fácil de verificar en planta de manera puntual (ver párrafo siguiente); sin embargo, no ocurre lo mismo con el consumo fuera de régimen (Cfr). Por ello, es una gran ventaja que, al validar los valores de Cer, también se validan los valores de Cfr.

Para validar en planta el valor del Cer obtenido de las tendencias lineales ajustadas con la ecuación (5) solo hace falta una medición puntual en una o varias operaciones unitarias. Durante el funcionamiento de una operación unitaria, y con una planificación adecuada, se puede medir en forma representativa la cantidad consumida de un insumo y la cantidad producida de producto en un determinado período de tiempo. El cociente de dichas cantidades proporciona directamente el valor del consumo específico en régimen. La experiencia demuestra que, en procesos productivos con más de una operación unitaria, a veces la medición puntual del consumo específico en régimen se complica, por lo que es necesario realizar mediciones representativas en cada una de las operaciones unitarias que conforman el proceso. A pesar de esta complicación, las verificaciones puntuales del valor de Cer en procesos productivos y en operaciones unitarias dieron, en general, concordancias excelentes.

Por otra parte, el número de puntos no correlacionados con las tendencias lineales identificadas (por ejemplo, los cuatro puntos que quedan fuera de las tendencias identificadas en la gráfica de la Figura 6), no es un criterio que aumente o disminuya la confiabilidad del valor de Cer hallado con esas tendencias lineales. Sin embargo, los puntos no correlacionados son, en algunos casos, sumamente útiles para identificar el origen de ciertas deficiencias operativas e, incluso, de malas prácticas de registro de datos de consumo y de producción, así como para interpretar el comportamiento anómalo asociado a ciertas prácticas operativas que ocurren en forma puntual y periódica (por ejemplo, el mantenimiento semestral o anual que se realiza en una planta). Estos aspectos son examinados con cierto detalle en la sección titulada “Evaluación de la eficiencia productiva mediante el modelo lineal inverso”.

Tendencias lineales del Tipo 2

A continuación, se examina las tendencias lineales del Tipo 2, las cuales se generan a partir de datos de consumo y de producción que pertenecen a una mezcla de dos o más regímenes de producción (es decir, los datos de dichos regímenes fueron registrados en forma global y no por separado). En la gráfica de la Figura 7 se presenta datos reales del consumo específico de energía eléctrica (EE) para una curtiembre. En dicha gráfica, existen dos tendencias lineales del Tipo 2 (la quinta y la sexta), cuyos regímenes de producción son significativamente distintos entre sí (es decir, estas dos últimas tendencias, aunque tienen valores similares de Cfr, tienen distintos valores de Cer). Debajo de dichas tendencias, se muestra cuatro tendencias adicionales que se ajustaron con relación a un mismo punto, con el propósito de verificar si alguna de ellas pertenece al régimen de producción correspondiente a alguna de las dos últimas tendencias, cosa que no ocurre (es decir, el valor de Cer de las cuatro primeras tendencias no coincide con el valor de Cer de las dos últimas tendencias). Por lo tanto, se podría afirmar, como una hipótesis de trabajo plausible, que el consumo de energía eléctrica durante el proceso de producción de piel curtida está constituido por múltiples regímenes de producción y, por ende, las operaciones unitarias de dicho proceso y/o sus parámetros operativos no son uniformes.

En efecto, en la curtiembre diagnosticada, la energía eléctrica se utilizaba tanto en las operaciones asociadas al proceso de curtido, como en operaciones adicionales asociadas al acabado final de las pieles curtidas (ver “Guía técnica de PML para curtiembres”, CPTS, febrero 2003). Sucede que, durante

algunos meses del año, solo se curte pieles; en otros meses, se curte pieles y se realiza el acabado de otras pieles previamente curtidas; y, en algunos meses, solo se realiza el acabado. Más aún, se curte pieles de distinta naturaleza (por ejemplo, pieles de ganado vacuno; y pieles de ganado caprino). Todas estas variantes operativas y sus combinaciones, hacen que la gráfica de C_e en función de V_p muestre regímenes de producción que son distintos entre sí. En este caso, para identificar los distintos regímenes de producción, sería necesario registrar datos de consumo y de producción de cada régimen por separado, cosa que normalmente no ocurre (por ejemplo, la curtiembre posee un solo medidor de energía eléctrica que registra solamente el consumo total mensual).

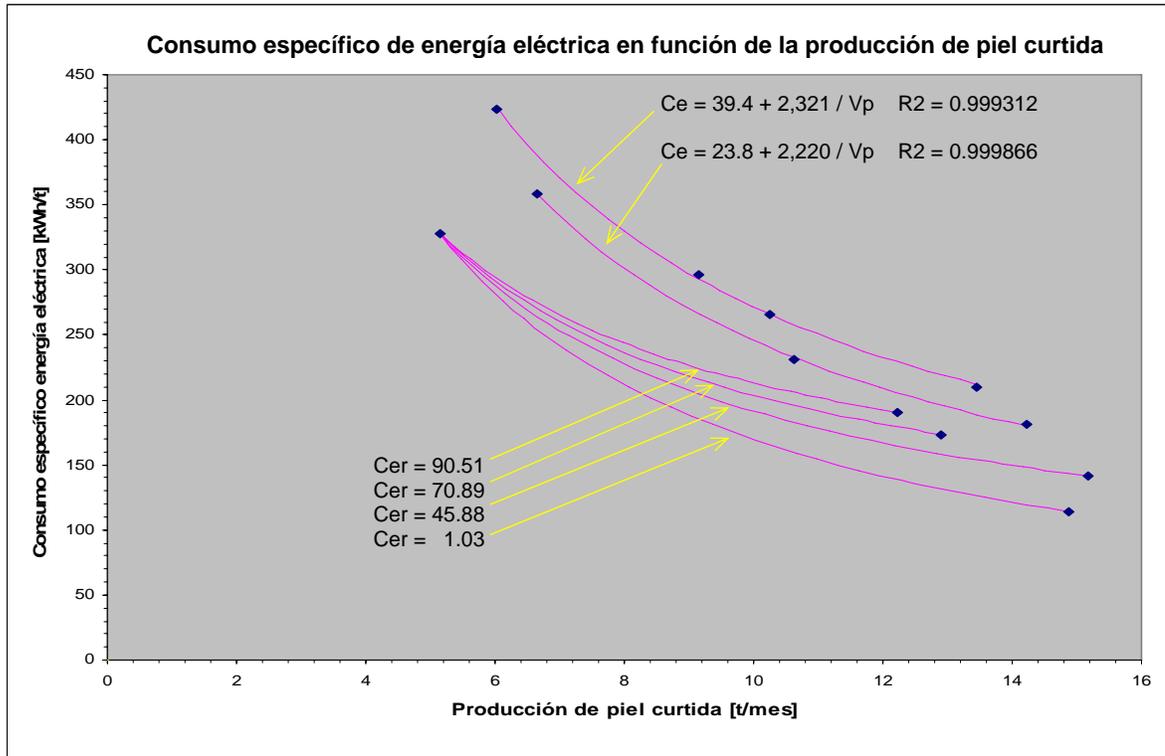


Figura 7. Gráfica con seis tendencias lineales, dos de ellas con más de dos puntos y 4 de ellas relacionadas a un mismo punto, todas ajustadas con la ecuación (5). Las dos últimas tendencias poseen distinto valor de C_{er} , pero similar valor de C_{fr} (Tipo 2).

Cuando una empresa opera con múltiples regímenes de producción, como en el caso anterior, el hecho de hallar una determinada tendencia lineal, por muy confiable que sea dicha tendencia en sí misma, no asegura que su valor de C_{er} corresponda a un régimen de producción individual; es decir, a un régimen de producción que esté asociado solamente a un determinado proceso o a una determinada operación unitaria. Por el contrario, es muy probable que corresponda a una mezcla de dos o más regímenes de producción, en los que se consume un mismo insumo en el mismo período de tiempo. Esta incertidumbre hace que los distintos valores de C_{er} identificados no sean utilizables, ya que ninguno de ellos podría ser atribuido a un régimen de producción individual. Cabe remarcar que esta situación no significa que los valores de C_{er} correspondientes a las dos últimas tendencias lineales no sean reales; el que no sean utilizables se debe a que dichos valores no pueden ser atribuibles a un régimen de producción individual. Por ejemplo, incluso en la última tendencia lineal de la gráfica de la Figura 7, que está conformada por 4 puntos altamente correlacionados, no existe la seguridad de que se trate de un único régimen de producción de los múltiples existentes, ya que pudo ocurrir que, durante los cuatro meses representados por los cuatro puntos, existieron dos o más regímenes de producción operando en forma simultánea y consumiendo el mismo insumo (en este caso, energía eléctrica). Una evidencia de esta afirmación, es que dicha tendencia posee un valor de C_{er} que es casi el doble en magnitud que el valor de C_{er} de la penúltima tendencia lineal (conformada por tres puntos); y es probable que ésta tampoco corresponda a un régimen de producción individual.

Más aún, si se compara la gráfica del consumo específico de GN (Figura 6), con la gráfica del consumo específico de energía eléctrica (Figura 7), ambas obtenidas a partir de datos de consumo y de producción de piel curtida, registrados por la misma curtiembre durante un mismo periodo, se observa que existe un único régimen de producción para el consumo de gas natural, pero no así para el consumo de energía eléctrica. Sucede que, en esta curtiembre, el gas natural se consume solo para generar vapor mediante una caldera que suministra vapor mayoritariamente a los fulones donde se realiza el curtido al cromo para obtener Wet Blue (ocasionalmente se utiliza vapor en otras operaciones, como la del planchado de cuero, pero en cantidades que no son significativas). Por lo tanto, queda clara la razón por la cual existe un único régimen de producción respecto al consumo de gas natural, y no así respecto al consumo de energía eléctrica.

Otro ejemplo de tendencias lineales generadas por múltiples regímenes de producción se ilustra en la gráfica de la Figura 8, que corresponde a una planta de productos lácteos (helados, yogurt y otros). También en este caso, el consumo de energía eléctrica se registra en forma global para la producción de varios productos. Es interesante notar que el consumo específico de energía eléctrica en régimen varía entre 255 y 307 kWh por tonelada de helado producido, mientras que el consumo mensual fuera de régimen es prácticamente una constante (consumo mensual promedio fuera de régimen = 39,839 kWh/mes). Este consumo fuera de régimen es atribuido a la energía eléctrica utilizada principalmente para la producción de frío en las cámaras de conservación de los varios productos y para un banco de agua helada (nótese que estos sistemas operan en forma constante, durante las 24 horas del día, casi en forma independiente del volumen de producción de helado, yogurt, bolos y otros productos), e incluye el consumo de energía eléctrica para iluminación de ambientes, duchas, bombeo de agua de pozo y otros usos varios.

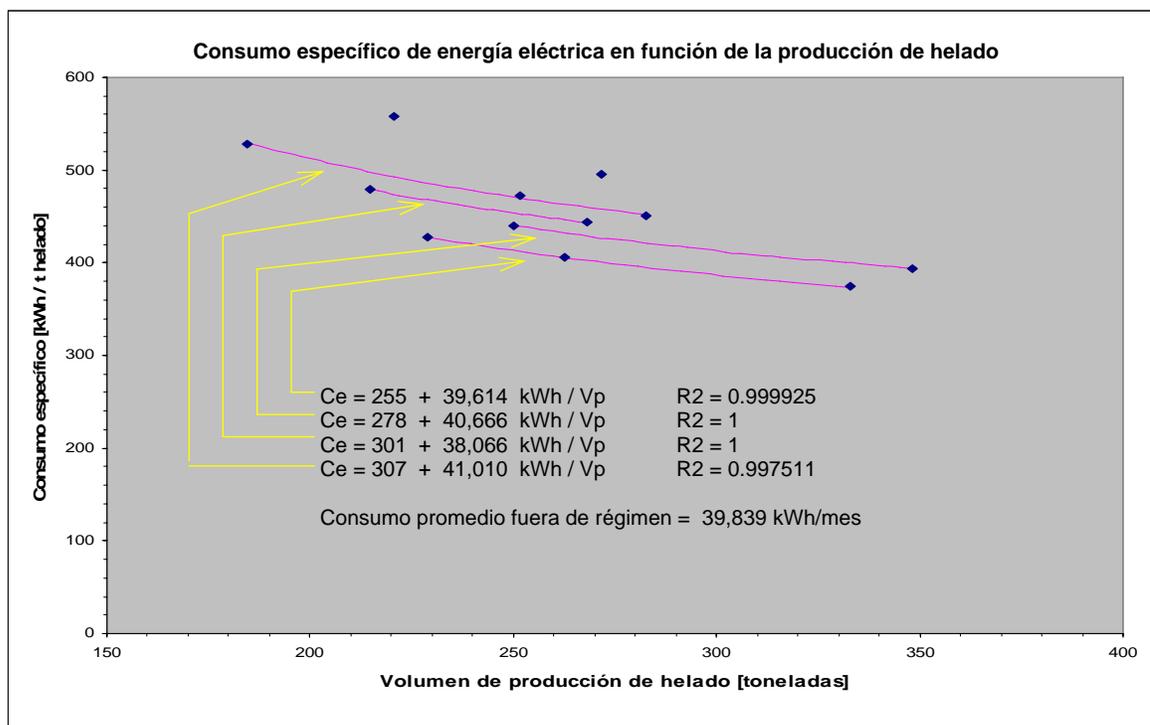


Figura 8. Gráfica con cuatro tendencias lineales, ajustadas con la ecuación (5), cada una con distinto valor de C_e , pero similar valor de C_{fr} (Tipo 2).

Si bien cada una de las dos tendencias centrales está conformada por solo dos puntos, las tendencias primera y cuarta están conformadas cada una por tres puntos bastante bien correlacionados, lo cual proporciona confiabilidad al hecho de que las cuatro tendencias son reales, aunque sus valores de C_e no sean utilizables para identificar un determinado régimen de producción de los múltiples existentes.

En resumen, cuando en una gráfica de C_e en función de V_p se identifica tendencias lineales con múltiples valores de C_{er} (es decir, existen múltiples regímenes de producción que generan tendencias lineales del Tipo 2), ninguno de los valores de C_{er} asociados a dichas tendencias lineales es utilizable, ya que ninguno puede ser atribuido a un determinado régimen de producción individual. Lo más probable es que cualquiera de dichos valores de C_{er} sea atribuible a una mezcla de dos o más regímenes de producción que consumen un mismo insumo en el mismo período de tiempo. Por lo tanto, a pesar de que cada tendencia lineal sea confiable en sí misma, ninguna puede ser utilizada para identificar un determinado régimen de producción individual.

Tendencias lineales del Tipo 3

Finalmente, se examina las tendencias lineales del Tipo 3. En la gráfica de la Figura 9 se muestra tres tendencias lineales del Tipo 3 (los datos de esta gráfica corresponden a una operación de deshidratado de frutas). Merece la pena recordar que las tendencias de Tipo 3 son aquellas que presentan valores de C_{er} no muy distintos entre sí (i.e. 15.0, 12.7 y 17.8), aunque sus valores de C_{fr} sí lo son. Cabe destacar que la tercera tendencia está conformada por cinco puntos relativamente bien correlacionados. Esto implica que durante cinco meses, algunos de ellos consecutivos, se mantuvo un régimen de producción bastante uniforme. La primera y segunda tendencias lineales, con dos y tres puntos, respectivamente, tienen valores de C_{er} no muy distintos, lo que incrementa la confiabilidad de que las tres tendencias lineales pertenecen a un mismo régimen de producción.

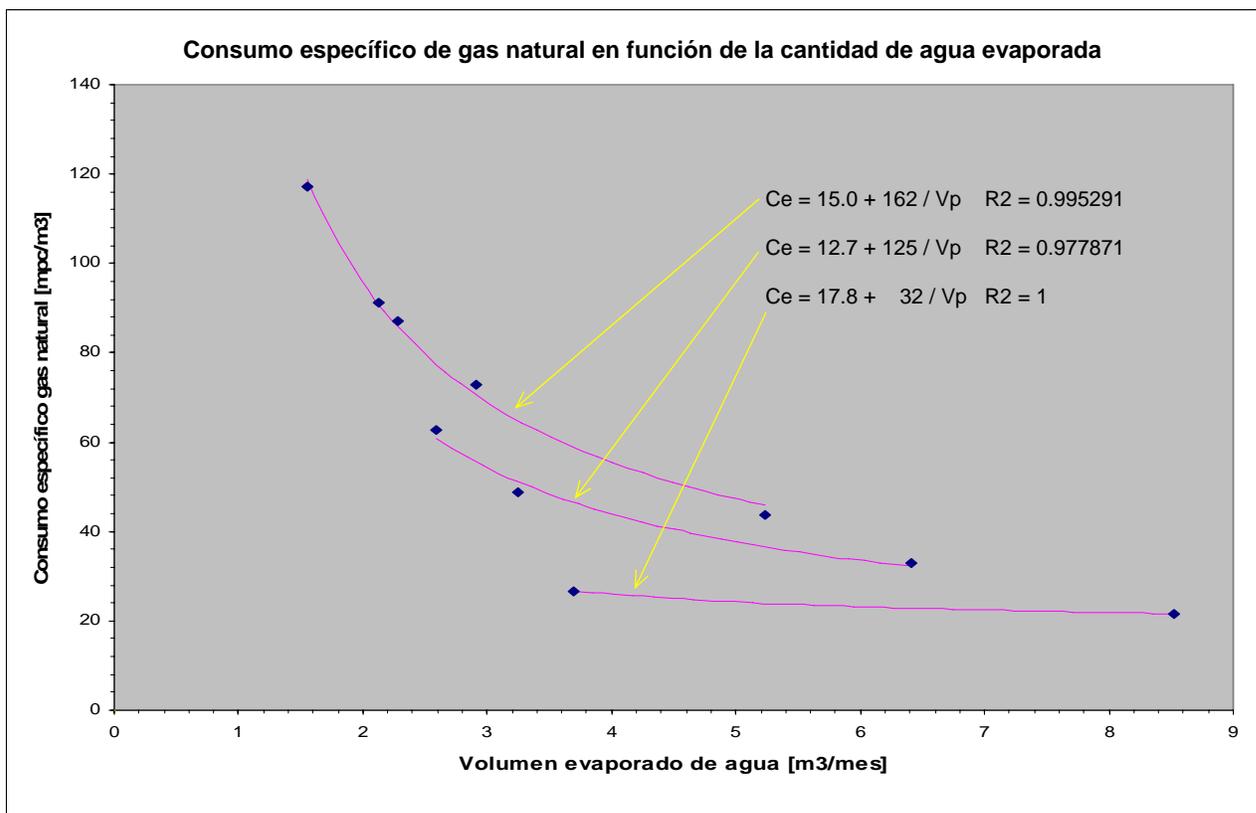


Figura 9. Gráfica con tres tendencias lineales, ajustadas con la ecuación (5), cada una de las cuales tiene un valor similar de C_{er} , y valores distintos de C_{fr} .

Se presume que las diferencias entre los valores de C_{er} no se deben, por ejemplo, a cambios en el número de operaciones unitarias asociadas al proceso productivo, sino tan solo a diferencias, no muy significativas, en los parámetros operativos y/o en las características de los insumos utilizados, aspectos que se verificaron durante el diagnóstico de PML realizado en planta. Por ejemplo, el consumo de GN en régimen durante el proceso de deshidratado de frutas es proporcional a la cantidad de agua evaporada.

Sin embargo, existen pequeñas diferencias en el consumo energético en función del tipo de fruta procesada. Por ejemplo, el consumo de GN para evaporar una determinada cantidad de agua durante el deshidratado de banano, difiere un poco del consumo de GN para evaporar la misma cantidad de agua durante el deshidratado de mango.

Sobre esta base, es aceptable, al menos como hipótesis de trabajo, hallar un valor promedio de C_{er} para las tres tendencias lineales del Tipo 3 (Figura 9), bajo la presunción de que existe un solo régimen de producción. El promedio de dicho valor debe ser ponderado en función del número de puntos contenidos en cada tendencia lineal, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_{er} \text{ (promedio ponderado)} = (C_{er_1} \times N_1 + C_{er_2} \times N_2 + \dots + C_{er_J} \times N_J) / (N_1 + N_2 + \dots + N_J) \quad (6)$$

Donde N es el número de puntos correlacionados de una tendencia lineal cualquiera, y los subíndices 1, 2, ..., J , identifican el valor de C_{er} y de N de cada una de las tendencias lineales que forman parte de un mismo régimen de producción. Por ejemplo, el promedio ponderado de C_{er} para el régimen de producción identificado mediante las tres tendencias lineales de la gráfica de la Figura 9, es:

$$\begin{aligned} C_{er} \text{ (promedio ponderado)} &= (15.0 \times 5 + 12.7 \times 3 + 17.8 \times 2) / (5 + 3 + 2) \\ &= 14.87 \text{ mpc/m}^3 \end{aligned}$$

Cabe señalar que la ecuación (6) no toma en cuenta la magnitud del coeficiente cuadrático de correlación de cada tendencia lineal que permitiría realizar una ponderación más exacta del valor de C_{er} (se puede demostrar que el error que se comete no es significativo al no considerar dicha magnitud).

En la gráfica de la Figura 10, las cuatro tendencias lineales tienen valores de C_{er} similares, lo cual sugiere la existencia de un solo régimen de producción, aspecto que fue verificado durante un diagnóstico de PML realizado en planta. Por ello, para fines prácticos, se puede asumir que las tendencias lineales son del Tipo 3, ya que se verificó que existe un único régimen de producción, con un promedio ponderado de C_{er} igual a 5.11 kWh/m^3 .

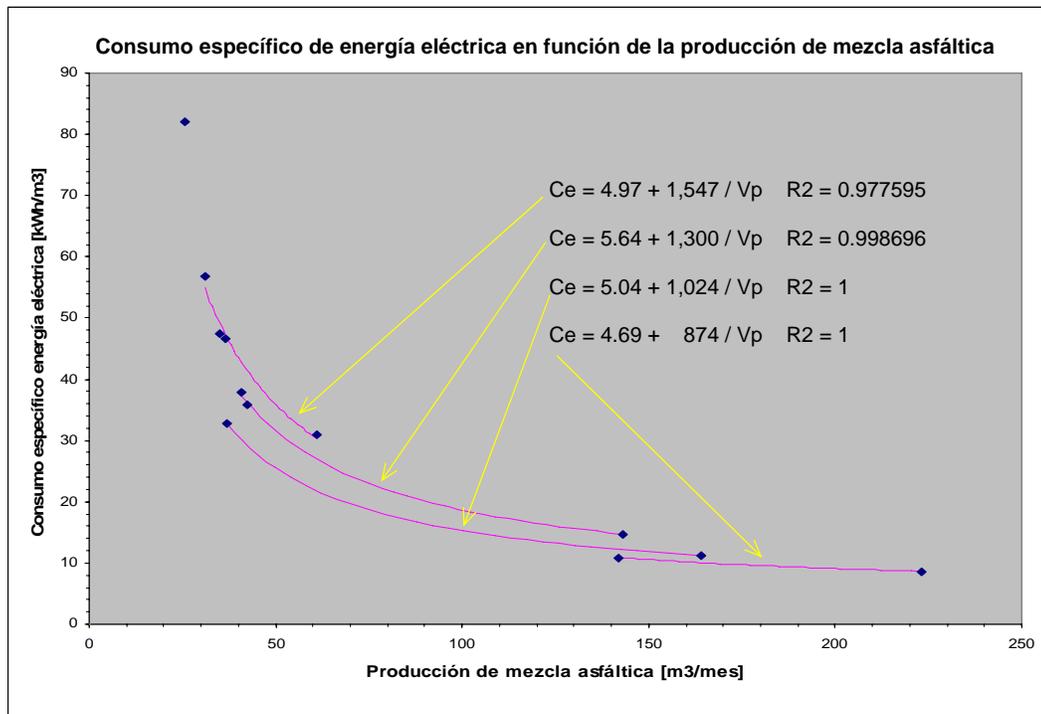


Figura 10. Gráfica con cuatro tendencias lineales, ajustadas con la ecuación (5), las cuales tienen un valor similar de C_{er} y valores distintos de C_{fr} .

En efecto, la gráfica de la Figura 10 contiene tendencias lineales que son del Tipo 3, debido a que los agregados utilizados como materia prima no ingresan al horno rotatorio con una humedad uniforme. Esto exige que los tiempos de residencia varíen un poco en función de la humedad inicial de dicha materia prima y, por ende, existen pequeñas diferencias en el consumo en régimen de energía eléctrica por metro cúbico de mezcla asfáltica producida. Por otra parte, en la gráfica existe un solo punto que no está correlacionado con las cuatro tendencias lineales; pero, lo más probable, es que dicho punto pertenezca al mismo régimen de producción (es decir, es probable que pertenezca a una tendencia lineal cuyo valor de C_e es igual o muy próximo al valor promedio señalado, pero que tiene un valor de C_{fr} distinto del que tiene cualquiera de las cuatro tendencias lineales).

Cabe hacer notar que, en los dos casos de tendencias lineales del Tipo 3 arriba descritos (ver gráficas de las Figuras 9 y 10), el conocimiento de la naturaleza de los regímenes de producción es lo que permite concluir que las correspondientes tendencias lineales son del Tipo 3. Por ejemplo, sin dicho conocimiento, habría dudas sobre si la gráfica de la Figura 9 contiene tendencias lineales del tipo 3 o del Tipo 2, debido a que no es solamente la magnitud de las diferencias que existen entre los valores de C_e la que determina si las tendencias identificadas son del Tipo 3 o del Tipo 2. Para afirmar que dichas tendencias son del Tipo 3, es necesario verificar en planta que la producción corresponde a un único régimen de producción, a partir de lo cual es recién aceptable interpretar la magnitud de las diferencias observadas en los valores de C_e .

Para una mejor comprensión de los criterios adicionales a ser planteados para la identificación confiable de regímenes de producción, a continuación se realiza un análisis de la gráfica de la Figura 11, la cual contiene datos sobre el consumo específico de diesel en función de la producción de singani (brandy).

El siguiente ejercicio es un análisis destinado a ilustrar qué condiciones deberían cumplirse para que las tendencias lineales existentes en dicha gráfica sean del Tipo 1, 2 y 3, sin tomar en cuenta el conocimiento previo sobre la naturaleza del régimen de producción de singani.

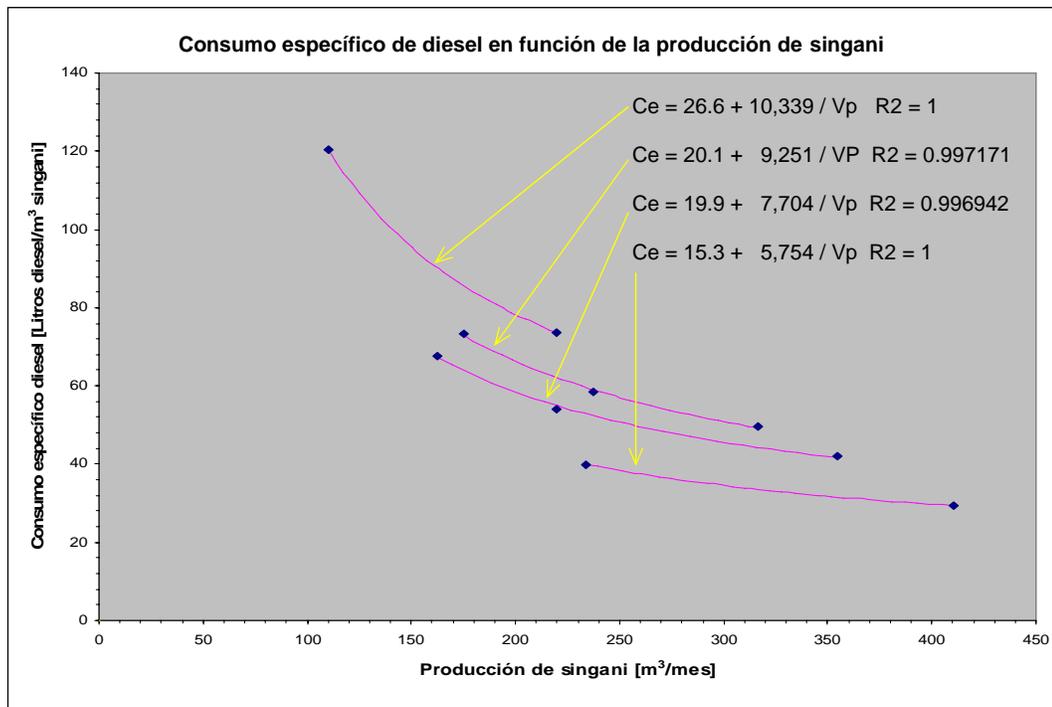


Figura 11. Gráfica con cuatro tendencias lineales, ajustadas con la ecuación (5), dos de las cuales tienen un valor similar de C_e , y valores distintos de C_{fr} .

- La condición para que en la gráfica de la Figura 11 existan tendencias lineales del Tipo 1, es que las mismas tengan un único valor de Cer. Para cumplir con esta condición, solamente los seis puntos de las dos tendencias lineales del centro deben estar correlacionados, con tres puntos en cada tendencia lineal, y con prácticamente el mismo valor de Cer (i.e., 20.1 y 19.9 L/m³). Más aún, los cuatro puntos restantes, que se los muestra por pares en la primera y cuarta tendencias lineales, no deben estar correlacionados. Es decir, los cuatro puntos que no pertenecen a las dos tendencias centrales deben quedar solos, sin ser correlacionados entre sí (es decir, no como se los muestra en la gráfica). Por lo tanto, si solo se considera las dos tendencias lineales del centro, éstas serían del Tipo 1, ya que pertenecen a un único régimen de producción, con un Cer promedio igual a 20 L/m³, y con cuatro puntos no correlacionados entre sí (los cuatro puntos que conforman la primera y cuarta tendencias lineales). Estos cuatro puntos pertenecerían a cuatro tendencias lineales distintas, con el mismo valor de Cer que el de las dos tendencias centrales, pero con distintos valores de Cfr.
- La condición para que en la gráfica de la Figura 11 existan tendencias lineales del Tipo 2, es que las mismas tengan valores de Cer distintos entre sí. Para cumplir esta condición, los cuatro puntos que conforman la primera y la cuarta tendencias lineales tendrían que estar correlacionados por pares, tal como se los muestra en la gráfica de la Figura 11. De este modo, se tendría tres valores distintos de Cer, uno de los cuales sería el valor promedio del Cer correspondiente a las dos tendencias centrales (cabe recordar que si se supone que dos o más puntos están correlacionados, significa que se está suponiendo que dichos puntos necesariamente pertenecen a un régimen de producción individual o a una mezcla de dos o más regímenes de producción).
- La condición para que en la gráfica de la Figura 11 existan tendencias lineales del Tipo 3, es que se cumplan prácticamente las mismas condiciones que las descritas en el párrafo anterior para el caso de las tendencias lineales del Tipo 2; aunque, posiblemente, pero no necesariamente, los valores de Cer no tendrían que ser tan distintos entre sí, como es el caso de los valores de Cer de la primera y de la cuarta tendencias lineales (el valor de Cer de la cuarta tendencia, 26.6 L/m³, es casi el doble del valor de Cer de la primera tendencia, 15.3 L/m³).

Un análisis de estas condiciones, sin tomar en cuenta el conocimiento previo de la naturaleza del régimen de producción de singani, lleva a las siguientes conclusiones:

- Es muy poco probable que las tendencias lineales de la gráfica de la Figura 11 sean del Tipo 3, debido principalmente a que los valores de Cer de la primera y de la cuarta tendencias lineales son significativamente distintos entre sí.
- Si las tendencias lineales de la gráfica de la Figura 11 fueran del Tipo 2, no sería fácil explicar la existencia de las dos tendencias centrales, las cuales definitivamente sugieren la existencia de un único régimen de producción. En este sentido, tampoco es probable que dichas tendencias sean del Tipo 2.

Por lo tanto, y como hipótesis de trabajo, se concluye que la gráfica de la Figura 11 contiene solamente dos tendencias lineales identificadas, con el mismo valor de Cer y distinto valor de Cfr, más cuatro puntos no correlacionados, por lo que dichas tendencias lineales son, en realidad, estrictamente del Tipo 1. Esta es una hipótesis de trabajo que conduciría a planificar el diagnóstico de PML en planta, y que debería incluir la verificación del valor de Cer hallado mediante la gráfica, a fin de validarlo como un indicador para futuras comparaciones.

Criterios complementarios para la identificación de tendencias lineales

A continuación se presenta un conjunto adicional de cinco criterios, que son complementarios a los tres criterios ya presentados en la parte inicial de esta Sección, y que son aplicables para la identificación de tendencias lineales asociadas a un régimen de producción:

- **Cuarto criterio.** La confiabilidad del valor de Cer de un régimen de producción identificado mediante sus tendencias lineales es tanto mayor cuanto mayor sea la semejanza de las mismas con las

tendencias del Tipo 1. En general, el orden de confiabilidad de los tres tipos de tendencias lineales para identificar regímenes de producción, es el siguiente:

- Tendencias lineales del Tipo 1 (i.e., iguales valores de Cer; distintos valores de Cfr). Las tendencias lineales del Tipo 1 son siempre confiables para establecer el valor de Cer de un régimen de producción (cabe recordar que, aunque el valor de Cer sea confiable, para ser válido, necesariamente requiere ser verificado en planta).
- Tendencias lineales del Tipo 3 (i.e., similares valores de Cer; distintos valores de Cfr). Las tendencias lineales del Tipo 3 son menos confiables que las del Tipo 1 para establecer el valor de Cer de un régimen de producción (cabe aclarar que, por ser menos confiables, no significa que dejan de ser confiables). La confiabilidad de las tendencias del Tipo 3 disminuye conforme se incrementan las diferencias entre los valores de Cer; y viceversa. De cualquier manera, un valor de Cer, al igual que en el caso del Tipo 1, requiere ser verificado para ser válido.
- Tendencias lineales del Tipo 2 (i.e., distintos valores de Cer; iguales o distintos valores de Cfr). Las tendencias lineales del Tipo 2 son confiables en sí mismas, pero no son utilizables para establecer un régimen de producción, excepto en algunos casos particulares, cuando dichas tendencias son mezclas de dos o más grupos de tendencias del Tipo 1 o del Tipo 3 (ver adelante).

Ejemplos de la aplicación del cuarto criterio son proporcionados durante las discusiones relacionadas con las Figuras 9, 10 y 11, en las páginas 18, 19 y 20.

- **Quinto criterio.** El valor de Cer de una tendencia lineal conformada solamente por dos puntos, es confiable solo en la medida en que exista otra tendencia lineal, con tres o más puntos correlacionados, que posea el mismo valor de Cer. Caso contrario, el valor de Cer de los dos puntos mencionados no es confiable, ya que es muy probable que cada uno de los dos puntos pueda pertenecer a una tendencia lineal distinta que, si bien pueden corresponder a un mismo régimen de producción (i.e., pueden tener el mismo valor de Cer), poseen distintos valores de Cfr. Un ejemplo del quinto criterio ya fue proporcionado en la página 21, y se dan otros ejemplos después de la descripción del octavo criterio.
- **Sexto criterio.** Debido a que una gráfica se elabora solamente a partir de valores de Ce positivos, graficados en función de Vp, entonces:
 - Todo valor negativo de Cer, hallado a partir de dicha gráfica, debe ser rechazado, salvo en algunos casos especiales que se analizan en la Sección "Criterios de confiabilidad relacionados con valores negativos de Cer y Cfr", ya que merecen ser examinados caso por caso. Es decir, no es posible producir un producto a partir de un insumo y, al mismo tiempo, producir dicho insumo en mayor cantidad que la cantidad utilizada para producir el producto. Cabe hacer notar que el reciclaje interno de un insumo utilizado dentro del régimen de producción, solo contribuye a disminuir el valor de Cer, pero jamás lo podría volver negativo.
 - Todo valor negativo de Cfr, hallado a partir de dicha gráfica, debe ser rechazado, debido a que el valor mínimo de Cfr, que es físicamente concebible, es cero. Sin embargo, por causas artificiales relacionadas con la forma de realizar el registro de datos de consumo, se puede encontrar valores negativos de Cfr. Estos casos se analizan en la Sección "Criterios de confiabilidad relacionados con valores negativos de Cer y Cfr", ya que merecen ser examinados en forma individual.

Ejemplos del sexto criterio son proporcionados en la Sección "Criterios de confiabilidad relacionados con valores negativos de Cer y Cfr", junto con una explicación de las causas particulares por las que se pueden observar valores negativos de Cer y de Cfr.

- **Séptimo criterio.** En las tendencias lineales del Tipo 1, la que tenga un mayor número de puntos correlacionados o, en su defecto, la que tenga el más alto coeficiente de correlación (excluyendo tendencias lineales conformadas por solo dos puntos), es la tendencia lineal cuyo valor de Cer es más confiable. En el caso de que las tendencias lineales tengan similar confiabilidad, entonces se debe

hallar el valor promedio de los Cer (es suficiente hallar el promedio aritmético). Ejemplos del séptimo criterio son proporcionados en las páginas 14 y 15.

- **Octavo criterio.** En las tendencias lineales del Tipo 3, el valor de Cer debe hallarse como un promedio ponderado de los valores de Cer de las tendencias lineales identificadas, utilizando para ello la ecuación (6). Ejemplos del octavo criterio son proporcionados en la página 19.

Por su importancia, a continuación se proporciona dos ejemplos adicionales para ilustrar el quinto criterio. Un primer ejemplo se ilustra con la gráfica de la Figura 12. La segunda y tercera tendencias de esta gráfica son del Tipo 3, y se quiere examinar la confiabilidad del valor de Cer de la primera tendencia, la cual está conformada solamente por dos puntos.

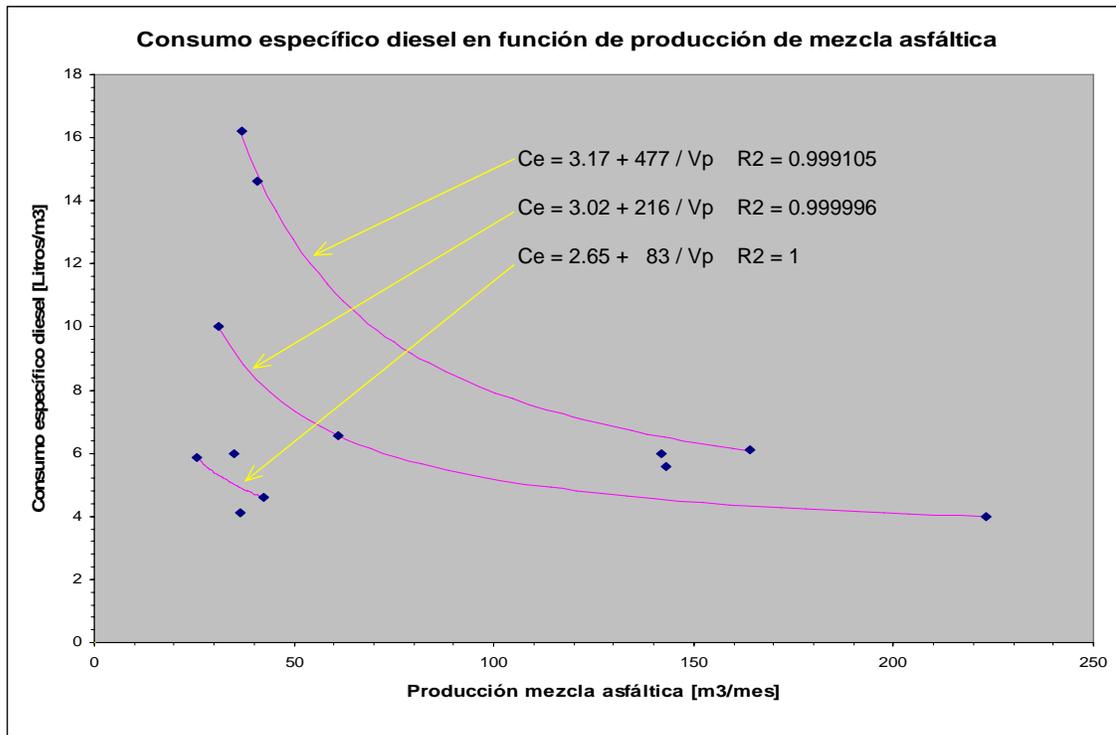


Figura 12. Gráfica con tres tendencias lineales ajustadas con la ecuación (5), dos de las cuales tienen un valor similar de Cer, y valores distintos de Cfr (Tipo 3). La primera tendencia fue ajustada con dos puntos que, en realidad, no están correlacionados.

Si en la gráfica de la Figura 12, se asumiera que los dos puntos de la primera tendencia realmente estuviesen correlacionados y, por ende, correspondiesen a un régimen de producción individual, con un valor de Cer distinto al de las tendencias segunda y tercera, entonces dicha gráfica contendría una mezcla de dos tipos de tendencias lineales, correspondientes a dos regímenes de producción distintos. Por ejemplo, las tendencias segunda y tercera son del Tipo 3, mientras que la primera tendencia, en presencia de las otras dos tendencias, representa tendencias lineales del Tipo 2; y, por tanto, habría una mezcla de tendencias del Tipo 3 y del Tipo 2.

Sin embargo, aplicando el quinto criterio, se concluye que el valor de Cer de la primera tendencia no es confiable, ya que está conformada por solo dos puntos y no existe otra tendencia lineal con su mismo valor de Cer. Obviamente, al no ser confiable, hace que la gráfica contenga solamente dos tendencias lineales del Tipo 3 (la segunda y la tercera), y un total de seis puntos no correlacionados, entre los que están incluidos los dos puntos de la primera tendencia. Sobre esta base, cabe ahora aplicar el octavo

criterio a las tendencias segunda y tercera de la gráfica de la Figura 12, a fin de hallar el promedio ponderado de C_{er} (3.10 L/m^3).

Para ilustrar con otro ejemplo el quinto criterio, se utilizará la gráfica de la Figura 13. Las dos primeras tendencias de esta gráfica son del Tipo 1, y se quiere examinar la confiabilidad del valor de C_{er} de la tercera tendencia, la cual está conformada solamente por dos puntos.

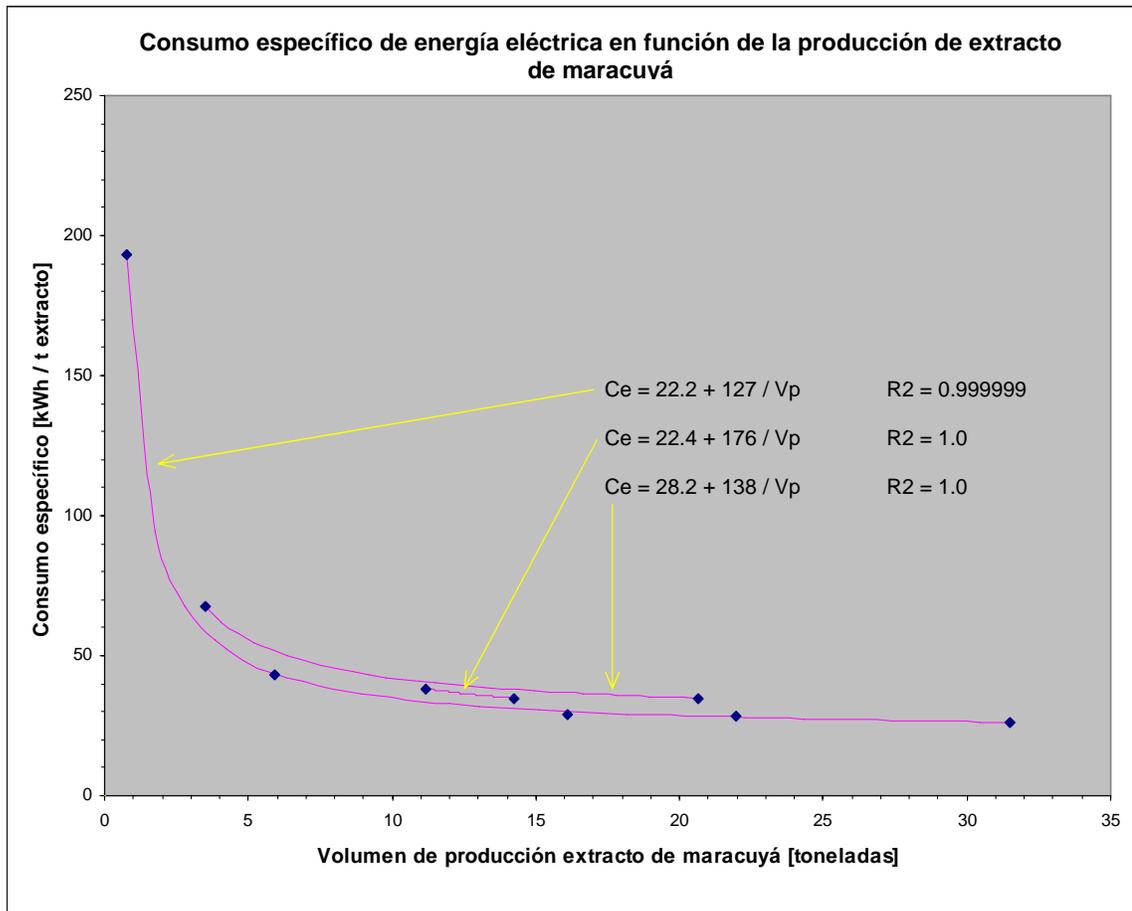


Figura 13. Gráfica con tres tendencias lineales ajustadas con la ecuación (5), dos de las cuales tienen valores casi iguales de C_{er} , y valores distintos de C_{fr} (Tipo 1). La tercera tendencia fue ajustada con dos puntos que, en realidad, no están correlacionados.

La primera tendencia lineal de la gráfica de la Figura 13 está conformada por cinco puntos altamente correlacionados. La segunda tendencia está conformada por solo dos puntos. Sin embargo, debido a que su valor de C_{er} es casi igual que el valor de C_{er} de la primera tendencia, se concluye que los dos puntos de segunda tendencia están correlacionados (ver quinto criterio), de manera que la primera y segunda tendencias definen un régimen de producción individual con un valor de C_{er} igual al de la primera tendencia ($C_{er} = 22.2 \text{ kWh/t}$; ver séptimo criterio).

Por otra parte, si en la gráfica de la Figura 13, se asumiera que los dos puntos de la tercera tendencia realmente estuviesen correlacionados y, por ende, correspondiesen a un régimen de producción individual, con un valor de C_{er} distinto al de las dos primeras tendencias, entonces dicha gráfica contendría una mezcla de dos tipos de tendencias lineales, correspondientes a dos regímenes de producción distintos. Por ejemplo, la primera y la segunda tendencias son del Tipo 1, mientras que la tercera tendencia, en presencia de las otras dos, representa tendencias lineales del Tipo 2; y, por tanto, habría una mezcla de tendencias del Tipo 1 y del Tipo 2. Sin embargo, aplicando el quinto criterio, se

concluye que el valor de C_{er} de la tercera tendencia no es confiable, ya que está conformada por solo dos puntos y no existe otra tendencia lineal con su mismo valor de C_{er} . Obviamente, al no ser confiable, hace que la gráfica contenga solamente dos tendencias lineales del Tipo 1 (la primera y la segunda), y un total de dos puntos no correlacionados (que son los dos puntos de la tercera tendencia lineal).

Finalmente, en una gráfica de C_e en función de V_p , es posible encontrar, aunque no con frecuencia, una mezcla de tendencias lineales del Tipo 3, o del Tipo 1, con tendencias lineales del Tipo 2. Un ejemplo, en el que la presencia de una mezcla de dos tipos de tendencias lineales fue verificada en planta, está dado por las tendencias identificadas en la gráfica de la Figura 14.

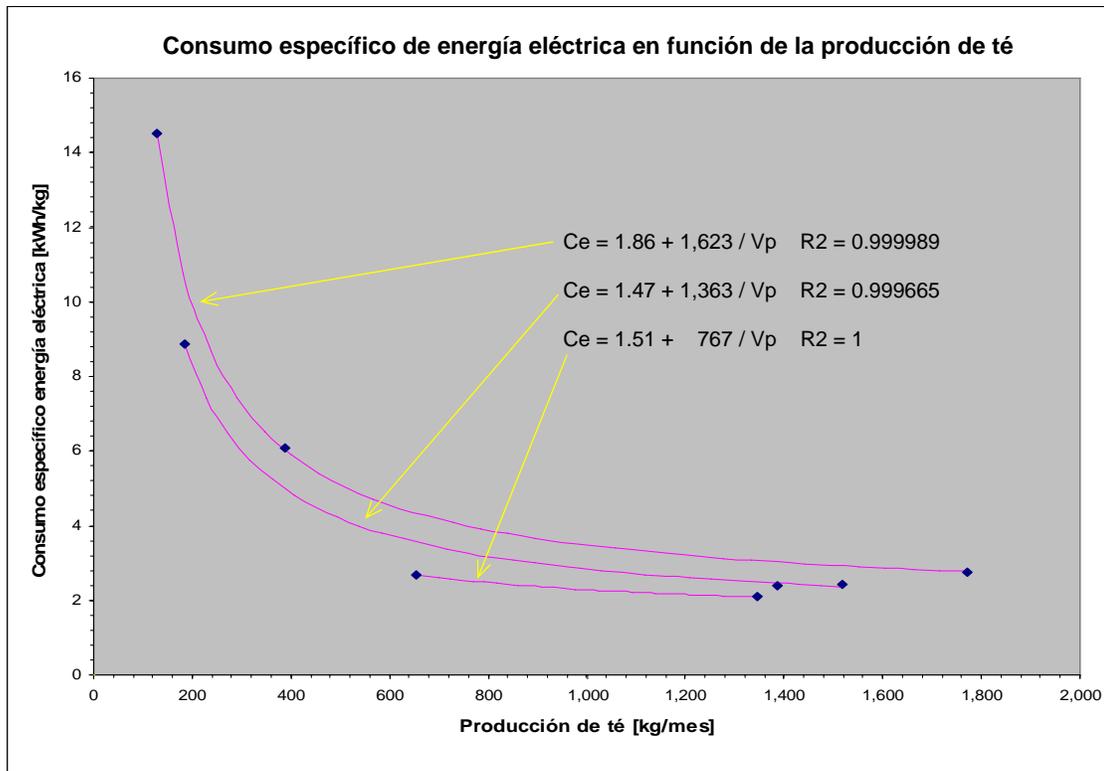


Figura 14. Gráfica con tres tendencias lineales, ajustadas con la ecuación (5), dos de las cuales tienen un valor similar de C_{er} , y valores distintos de C_{fr} (Tipo 1). La tercera tendencia pertenece a un régimen de producción significativamente distinto (Tipo 2) del que corresponde a las dos primeras tendencias.

Por ejemplo, la primera y segunda tendencias de la gráfica de la Figura 14 son del Tipo 3 (verificado en planta), y sus valores de C_{er} son muy próximos entre sí (i.e., 1.47 y 1.51 kWh/kg). Estas dos tendencias representan un régimen de producción cuyo valor de C_{er} es confiable (ver las condiciones mínimas de confiabilidad de un valor de C_{er}). La tercera tendencia lineal, que está conformada por tres puntos altamente correlacionados (la magnitud del coeficiente de correlación tiene casi cinco dígitos decimales con valor 9), tiene un valor de C_{er} igual a 1.86 kWh/kg, el cual es significativamente distinto del valor promedio de C_{er} correspondiente a la primera y segunda tendencias (promedio ponderado = 1.486 kWh/kg; el cual, después de redondear, da 1.49 kWh/kg). Por lo tanto, se concluye que la gráfica posee tendencias lineales del Tipo 3 y del Tipo 2. La primera y segunda tendencias, que son del Tipo 3, permiten identificar, de manera confiable, un régimen de producción con $C_{er} = 1.49$ kWh/kg. Si bien la tercera tendencia, con $C_{er} = 1.86$ kWh/kg, es altamente confiable en sí misma, no asegura que su valor de C_{er} corresponda a un régimen individual, debido a que no existe una cuarta tendencia lineal que posea el mismo o similar valor de C_{er} , por lo que se requiere de una verificación en planta.

Resulta que, luego de la verificación, los dos regímenes de producción identificados en la gráfica de la Figura 14, corresponden a dos regímenes de producción diferentes: la manufactura de té verde (primera y segunda tendencias) y la de té negro (tercera tendencia). El té negro requiere de un tiempo de marchitado de 10 a 14 horas, mientras que el té verde requiere tan solo de una hora. Esto hace que el consumo específico de energía eléctrica para el té negro sea mayor que para el té verde, dado que el venteador posee un motor que tiene una demanda de potencia de 10 kW (la operación de marchitado representa el 37% del consumo total de energía eléctrica). El resto de las operaciones posee una demanda de potencia muy similar tanto para té verde como para té negro.

En general, si en una gráfica de C_e en función de V_p existieran dos grupos de tendencias lineales, cada uno del Tipo 1 o 3, y cada grupo con un valor distinto de C_{er} , entonces el valor de C_{er} de cada grupo es confiable, y puede ser atribuido a un determinado régimen de producción individual. Sin embargo, los dos grupos también constituirían tendencias lineales del Tipo 2 y, por ende, este es un caso excepcional donde los valores de C_{er} de tendencias lineales del Tipo 2 serían utilizables para identificar dos regímenes de producción distintos.

En base a todos los criterios expuestos en la presente Sección, el procedimiento que se debe seguir para identificar tendencias lineales a partir de una gráfica de C_e en función de V_p , es buscar, en primer lugar, tendencias del Tipo 1. En ausencia de tendencias del Tipo 1, se debe intentar identificar tendencias del Tipo 3; y, en ausencia de este tipo de tendencias, se debe recién identificar todas las tendencias individuales posibles, independientemente de cuán diferentes sean sus valores de C_{er} (Tipo 2).

El análisis, tanto de los regímenes de producción identificados en forma confiable, como el valor de C_{er} de las tendencias lineales del Tipo 2 (que no son utilizables, excepto cuando ocurren como mezcla de dos grupos de tendencias del Tipo 1 o Tipo 3), son muy útiles para identificar causas que generan ineficiencias en los procesos productivos.

Cálculo del consumo específico (CE)

El cálculo del consumo específico (C_e) de cualquier insumo se realiza normalmente a partir de los datos registrados del consumo mensual del insumo considerado (C_t) y del volumen de la producción mensual (V_p), aplicando para ello la ecuación (2). Dicho cálculo requiere que se registre el C_t de un insumo y el V_p de un producto, en forma periódica (día, semana, mes y año). La unidad de tiempo para el registro del consumo y de la producción normalmente es el mes (muy pocas empresas registran períodos de consumo y de producción semanales o diarios); y, a partir de estos registros mensuales, las empresas elaboran registros trimestrales, semestrales y/o anuales.

En el Cuadro 3 se presenta un protocolo sencillo para listar los datos mensuales registrados de C_t y V_p (columnas 2 y 3 de dicho cuadro), a partir de los cuales se calcula los valores correspondientes de C_e (columna 4), utilizando para ello la ecuación (2).

Es importante tener en cuenta que el consumo específico global (C_{eG} ; ver Cuadro 3) correspondiente a los N meses del registro de datos de C_t y V_p , es un promedio ponderado de los N valores mensuales de C_e . Por ello, no puede ser obtenido mediante el promedio aritmético de los mismos, sino a través de la siguiente ecuación:

$$C_{eG} = (\sum C_{tN}) / (\sum V_{pN}) \quad (7)$$

Cabe hacer notar que el símbolo $\sum C_{tN}$ es una forma de escritura simplificada, que equivale a:

$$\sum C_{tN} = \sum_{k=1}^N C_{t_k}$$

Similar escritura simplificada es aplicable al símbolo $\sum V_{pN}$ de la ecuación (7).

Cuadro 3. Protocolo (modelo) para el listado de datos del consumo, para un insumo dado, y de la producción mensual, junto con resultados del cálculo del consumo específico usando la ecuación 2.

Mes	Datos registrados del consumo de un insumo, y de la producción		Consumo específico de un insumo [Ct / Vp]
	Ct	Vp	
Mes 1	Ct ₁	Vp ₁	Ce ₁
Mes 2	Ct ₂	Vp ₂	Ce ₂
Mes 3	Ct ₃	Vp ₃	Ce ₃
.	.	.	.
.	.	.	.
Mes N	Ct _N	Vp _N	Ce _N
Totales	ΣCt_N	ΣVp_N	$Ce_G = (\Sigma Ct_N) / (\Sigma Vp_N)$

ΣCt_N = Sumatoria de los N consumos totales mensuales

ΣVp_N = Sumatoria de los N volúmenes de producción mensual

Ce_G = Consumo específico global de los N meses

El consumo específico global (Ce_G) puede ser utilizado como un indicador comparativo de la eficiencia global de un proceso productivo o de una de sus operaciones unitarias, solamente cuando el registro del consumo de un insumo (por ejemplo, agua, gas natural o energía eléctrica) y del volumen de producción se lleve a cabo en forma separada del registro de este mismo insumo que también se consume en otros procesos productivos o en otras actividades de la empresa.

Para contar con datos confiables de Ct y Vp, es de suma importancia que las cantidades de insumos consumidos y de productos producidos sean registrados para el mismo período en el que ocurrió el consumo y se produjo el producto. Si bien esta afirmación parece ser obvia, se ha observado que, lamentablemente, las fechas en las que se registra el consumo de una cantidad de insumo, no siempre coincide con las fechas del registro de la cantidad de producto producido a partir de esa cantidad de insumo. Este tipo de registro es simplemente inservible, tanto para el propósito de calcular consumos específicos mensuales, como para realizar un control operativo y un control gerencial básicos.

Por ejemplo, en varias empresas se observó que se lleva un solo registro sobre el consumo de insumos y el volumen de producción. Este registro, por lo general, está a cargo del departamento de administración de la empresa. El departamento de producción, por su parte, envía reportes diarios al departamento de administración pero no sistematiza ni registra esta información. Un examen de los registros de la administración, mostró que la fecha del registro de una determinada cantidad de producto, corresponde a la fecha en la que dicho producto ingresó a almacenes, y no corresponde al periodo en que dicho producto fue manufacturado. Un desfase similar se observó en el registro del consumo de algunos insumos, particularmente agua y energía eléctrica. Por ejemplo, las facturas de agua y de energía eléctrica, en muchos casos, llegan los primeros días del mes siguiente, mes en el cual se registran dichas facturas, mientras que el consumo en realidad corresponde al mes anterior. Lo que ocurre es que para asignar a un periodo determinado el consumo de un insumo, el departamento de administración suele guiarse por la fecha en la que se extiende la factura por la compra de este insumo. El problema es que esta fecha, en muchas ocasiones, no corresponde al periodo en el que efectivamente se consumió el insumo para la producción. Si los datos de consumo de insumos y producción presentan estos desfases temporales, se cometerán errores serios en el cálculo de consumos específicos. En algunas empresas, se observó casos extremos de hasta cuatro meses de desfase entre las fechas registradas del consumo y de la producción.

Otra forma inadecuada de registrar datos de consumo (Ct) y de producción (Vp), que no es útil para hallar consumos específicos confiables, ocurre cuando un mismo insumo, cuyo consumo se registra en forma global, es utilizado en dos o más procesos distintos para producir dos o más productos no relacionados entre sí. Cuando el consumo de un insumo no se registra mediante mediciones separadas para cada proceso, normalmente no existe una forma aceptable para identificar, dentro de cada período

determinado, qué cantidad de insumo se utilizó para producir qué cantidad de cada uno de los productos fabricados. Bajo estas características, el registro del consumo de un insumo es inservible, ya que normalmente da lugar a gráficas de C_e en función de V_p , donde no es posible identificar tendencia lineal alguna o, en el mejor de los casos, se identifican tendencias lineales del Tipo 2, cuyos valores de C_{er} no son confiables. Sin embargo, cuando existe un solo proceso productivo, y se tiene un insumo que se consume tanto en dicho proceso como en otras actividades de la empresa, entonces, la gráfica de C_e en función de V_p puede contener tendencias lineales del Tipo 1 o del Tipo 3, las cuales permiten identificar, en forma confiable, el valor de C_{er} correspondiente al régimen de producción asociado al mencionado proceso productivo.

Por ejemplo, el agua, la energía eléctrica y el gas natural, son tres insumos típicos que, además de ser insumos del proceso productivo de la empresa, también se los consume en otros menesteres, como en la iluminación general (energía eléctrica), la calefacción de ambientes (energía eléctrica y/o gas natural), las duchas (agua, energía eléctrica y/o gas natural), el uso en baños, cocina y riego de jardines (agua), y otros usos varios. Estos consumos ocurren fuera del proceso productivo u operación unitaria y, por lo tanto, las cantidades consumidas se reflejan en el consumo fuera del régimen de producción (C_{fr}), y no así en los consumos específicos en régimen (C_{er}). En este contexto, el valor de C_{fr} no distingue el consumo que es ajeno al proceso productivo del consumo debido a las intermitencias asociadas al proceso productivo (ver definiciones de C_{dr} y C_{fr} de la ecuación 1).

Por lo tanto, el valor de C_{fr} representa el consumo total mensual fuera del régimen de producción, cuya magnitud no es proporcional al volumen de producción, debido a que este consumo es independiente de las operaciones unitarias. Por ejemplo, la cantidad de agua que se consume en la cocina, la de la energía eléctrica que se consume en las oficinas de la administración, o la del gas natural que se consume en la caldera destinada a la generación de vapor para duchas y suministro de agua caliente en general, no es proporcional a la cantidad de producto producido.

En resumen, la confiabilidad de los consumos específicos (C_e), que se calculan mediante la ecuación 2, es totalmente dependiente de la forma en la que se mide y se registra los datos del consumo de insumos (C_t) y de los volúmenes de producción (V_p). El registro adecuado de dichos datos requiere de mediciones del consumo de insumos en forma separada del consumo fuera del proceso productivo o de la operación unitaria, asegurando además que exista reciprocidad entre las cantidades consumidas y las cantidades producidas.

Evaluación de la eficiencia productiva mediante el modelo lineal inverso

Los resultados de la identificación de tendencias lineales asociadas a un régimen de producción, a partir de una gráfica de C_e en función de V_p , son:

- El consumo específico en régimen (C_{er}).
- El consumo total fuera de régimen (C_{fr}) correspondiente a cada tendencia lineal identificada en la gráfica.
- El o los tipos de tendencias lineales contenidas en la gráfica, incluyendo la forma intrínseca de las mismas y la disposición gráfica de unas respecto de otras.
- El número, distribución y ubicación de los puntos no correlacionados de la gráfica.

Estos resultados se utilizan para evaluar la eficiencia productiva de un régimen de producción identificado, utilizando para ello el modelo del comportamiento de C_e en función de V_p , el cual se representa mediante la ecuación 5:

$$C_e = C_{er} + C_{fr} / V_p \quad (5)$$

En la práctica, se observa que la variación de la magnitud de C_{er} normalmente se produce por causas de naturaleza distinta a las causas que originan la variación de la magnitud de C_{fr} . Para simplificar el análisis que sigue se asume que el valor del consumo específico en régimen (C_{er}), incluyendo los valores del consumo fuera de régimen (C_{fr}) asociados a las tendencias lineales del régimen de producción

identificado, corresponden solamente a una operación unitaria del proceso global de producción. Más aún, entre las múltiples causas que pueden afectar la eficiencia productiva, se consideran solamente aquellas relacionadas con la eficacia de la operación unitaria, y las relacionadas con el sistema de gestión operativa, según el modelo simple representado en el diagrama de la Figura 15.

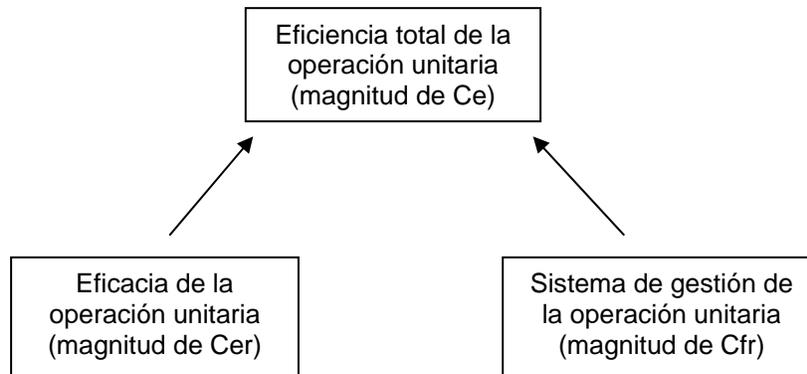


Figura 15. Diagrama que muestra la dependencia de la eficiencia operativa con la eficacia de una operación unitaria (determinada principalmente por la magnitud de C_{er}) y con su sistema de gestión (determinada principalmente por la magnitud de C_{fr}).

De acuerdo con dicho diagrama, una operación unitaria es tanto más eficaz y, por ende, más eficiente, cuanto menor sea el valor del consumo específico en régimen (C_{er}). Asimismo, dicha operación posee un sistema de gestión tanto más adecuado y, por ende, tanto más eficiente, cuanto menor sea el valor de su consumo total fuera de régimen (C_{fr}).

Sin embargo, cabe aclarar que la magnitud de C_{er} no depende íntegramente de la eficacia de la operación unitaria, ya que también depende, en cierto grado, del sistema de gestión. Por ejemplo, una fuga de agua no reparada puede contribuir al consumo específico en régimen, a pesar de ser un aspecto que depende de la gestión operativa (i.e. mantenimiento y reparación). De igual manera, la magnitud de C_{fr} no depende íntegramente del sistema de gestión, ya que también depende, en cierto grado, de la eficacia de la operación unitaria. Por ejemplo, un horno que es ineficaz en transferir calor también consumirá mayor cantidad de energía por unidad de producto durante el tiempo que dure una intermitencia (en este caso, el consumo total durante dicha intermitencia depende mayoritariamente del tiempo total planificado para cada intermitencia y, por ende, depende más de la gestión que de la eficacia de la transferencia de calor de dicho horno).

En general, de acuerdo con la experiencia del CPTS, la magnitud de C_{er} depende, principalmente, de los siguientes aspectos:

- **La naturaleza misma de los insumos y/o productos de la operación unitaria.** Por ejemplo, en el deshidratado de frutas, la humedad final de las mismas debe ser siempre inferior a 10%. Sin embargo, para deshidratar una fruta cuya humedad promedio inicial es del 80%, se consumirá mayor energía por unidad de masa de producto obtenido, que en el deshidratado de otra fruta, cuya humedad promedio inicial es del 60%.
- **La tecnología utilizada.** Existen tecnologías que, por su diseño y/o por su naturaleza, son más eficientes que otras. Por ejemplo, salvo pocas excepciones, las operaciones unitarias que operan en forma discontinua (es el caso de las que realizan transformaciones por lotes) son menos eficaces que las que operan en forma continua. Entre los ejemplos más típicos de la diferente eficacia que existe entre tecnologías que procesan en forma continua y discontinua, están el filtrado continuo comparado con el filtrado por lotes; el centrifugado continuo comparado con el centrifugado por lotes; el secado de materiales en hornos rotatorios comparado con hornos que operan por lotes; etc. En este último

ejemplo, el consumo de energía de los dos sistemas será siempre diferente, aún cuando ambos sistemas hayan sido optimizados. El mayor consumo de un sistema respecto de otro puede ser considerado como un consumo necesario e inevitable, ya que sin el mismo el sistema no podría funcionar. Un ejemplo típico de un consumo necesario y que implica una pérdida inevitable de energía, es el calor que debe ser eliminado junto con los gases de combustión que salen por la chimenea de una caldera, ya que sin dicha eliminación sería imposible sostener un tiraje adecuado por la chimenea.

- **Las prácticas preventivas adoptadas, incluyendo el mantenimiento preventivo y correctivo de la tecnología utilizada.** Estas prácticas sirven tanto para optimizar el rendimiento de las transformaciones de la materia prima en productos, como para minimizar la pérdida de insumos y de productos que, con frecuencia, incluso se puede evitar. Por ejemplo, no se debería desechar el agua limpia de enfriamiento, que sale caliente de un intercambiador de calor, ya que dicha agua puede ser reciclada, previo enfriamiento. Por otra parte, si existieran pérdidas de un insumo por fugas, el consumo del mismo, asociado a dichas pérdidas, incrementa el consumo específico en régimen. Por supuesto, estas pérdidas pueden evitarse mediante la eliminación de dichas fugas.

Por otra parte, la magnitud de Cfr depende, principalmente, de aspectos relacionados con el tipo de procedimientos operativos asociados a los sistemas de control productivo, de administración y gerenciales de la empresa. En la Sección anterior se dan algunos ejemplos típicos que ilustran el incremento de la magnitud de Cfr por falta de control productivo, así como por políticas gerenciales y procedimientos administrativos inadecuados.

Con el propósito de sistematizar el análisis de las causas que afectan la magnitud de Cfr, a continuación se presenta una clasificación de los tipos de consumo de insumos que ocurren fuera del régimen de producción (esta clasificación se basa en la definición del término Cfr de la ecuación (1)):

- Consumos por intermitencias propias de la operación unitaria. La cantidad de estos consumos que ocurren fuera del régimen de producción, pero dentro de la operación unitaria, se subdivide en:
 - Cantidad de insumo que se consume antes del inicio del régimen de producción. Por ejemplo, el calentamiento previo de un horno antes de que pueda ser utilizado.
 - Cantidad de insumo que se consume durante los períodos de intermitencia productiva. Por ejemplo, el gas natural que se consume para evitar que el horno se enfríe durante el tiempo que transcurre entre la salida y la entrada de los lotes de producción.
 - Cantidad de insumo que se pierde durante dichos períodos de intermitencia. Por ejemplo, si existe una fuga de gas natural, la pérdida de este insumo también ocurre durante el tiempo que transcurre entre la salida y la entrada de los lotes de producción.
 - Cantidad de insumo que se consume después de finalizado el régimen de producción. Un ejemplo típico es el consumo de agua para el lavado de la maquinaria, utensilios y pisos, entre otros.
- Consumos fuera de la operación unitaria, pero que se registran en forma global junto con los consumos dentro de la operación unitaria. Estos consumos se refieren a las cantidades de insumos que se consumen en otras actividades productivas y no productivas de una empresa, y que no se contabilizan en forma separada de los consumos asociados a la operación unitaria (ver Sección anterior).

Si bien la magnitud de Cfr engloba las magnitudes asociadas a ambos tipos de consumos fuera del régimen de producción (el modelo no permite distinguir entre dichas magnitudes), el análisis de ineficiencias operativas fuera del régimen de producción, exige que el evaluador identifique el o los orígenes del consumo de dichos insumos. Por ejemplo, si para una operación unitaria, se halla que la magnitud de Cfr es mucho más grande de lo que cabe esperar, entonces sería prematuro concluir con los resultados obtenidos que dicha operación unitaria es ineficiente. Por esta razón, el valor de Cfr, de no ser racional, solo sirve para llamar la atención del evaluador, quien debe identificar el origen del alto valor de Cfr, antes de emitir una opinión sobre la eficiencia de la operación unitaria.

Una consideración similar es válida para la magnitud de Cer, excepto que, en este caso, la comparación de dicha magnitud puede hacerse cuantitativamente con relación a un indicador previamente validado (es decir, un valor de Cer, obtenido en el pasado, y que en el presente puede ser usado como referencia comparativa). Si el valor actual de Cer, validado, es menor que el del pasado, entonces se puede concluir que la eficiencia de la operación unitaria ha mejorado; y viceversa. En el caso de que exista un incremento del valor actual de Cer, entonces el evaluador debe identificar el origen de dicho incremento y, si corresponde, tomar las medidas correctivas del caso o, en su defecto, proponerlas.

Un criterio que permite identificar posibles pérdidas de un insumo por fugas, es el incremento simultáneo tanto del valor de Cer como del valor de Cfr. Esto se debe a que una fuga, normalmente, incrementa el consumo de un insumo tanto dentro como fuera del régimen de producción.

Por otra parte, a partir del valor de Cer y de Vp, se puede hallar, mediante la ecuación (8), el valor del consumo total dentro del régimen de producción (Cdr). Despejando el término Cdr de la ecuación 4 (i.e., el consumo total dentro del régimen de producción), se tiene que:

$$\text{Cdr} = \text{Cer} \times \text{Vp} \quad (8)$$

La comparación del valor de Cdr con el valor de Cfr, permite identificar en qué grupo de causas, de las ya señaladas, se podría buscar el origen de posibles ineficiencias. Para ilustrar este criterio comparativo, a continuación se dan los siguientes ejemplos:

- Si el valor de Cdr es pequeño frente al valor de Cfr, existen dos posibles situaciones: la primera, y la más probable, es que se ha registrado en forma global el consumo de un insumo debido a otras actividades de la empresa; y, la segunda, la menos probable, es que la operación unitaria contempla un procedimiento de larga duración antes de iniciar la producción, y ésta dura un tiempo muy corto. Esta última es una situación que fue observada por el CPTS, en la que un horno rotatorio, de gran capacidad para la producción de carpeta asfáltica, era movido por energía eléctrica y previamente calentado con gas natural, siempre durante un mismo tiempo (una hora), antes de iniciar la producción, la cual duraba, en algunos casos, tan solo de 5 a 10 minutos, dependiendo de la cantidad de carpeta asfáltica requerida. Además, se verificó que la energía eléctrica y el gas natural no se utilizan en otras actividades de la empresa. En este caso, la demanda de potencia eléctrica para mover el horno era la misma dentro y fuera del régimen de producción y, por tanto, el consumo fuera de dicho régimen era alto comparado con el consumo en régimen (para $V_p = 50 \text{ m}^3$, $\text{Cdr} = 250 \text{ kWh/mes}$, y $\text{Cfr} = 1,547 \text{ kWh/mes}$; ver la tendencia lineal superior, en la gráfica de la Figura 10). Sin embargo, debido a que el calentamiento del horno, fuera del régimen de producción, se realizaba con un caudal reducido de gas natural y, dentro del régimen de producción, con un caudal mucho mayor, entonces la diferencia entre el valor de Cdr y Cfr no era muy grande (para $V_p = 50 \text{ m}^3$ de mezcla asfáltica, $\text{Cdr} = 40 \text{ mpc/mes}$; y $\text{Cfr} = 60 \text{ mpc/mes}$; ver la tendencia lineal superior en la gráfica de la Figura 5).
- Si el valor de Cdr es comparable con, o es más grande que, el valor de Cfr, entonces se debe examinar las posibles ineficiencias relacionadas con la naturaleza, la tecnología y las prácticas asociadas a la operación unitaria. Cabe hacer notar que, en las gráficas de las Figuras 4 a 14, la magnitud de Cdr es, en el mejor de los casos, comparable con la magnitud de Cfr. Para la mayoría de las operaciones unitarias, cabe esperar que la magnitud de Cdr sea significativamente mayor que la magnitud de Cfr. Sin embargo, cuando el insumo es agua, gas natural y energía eléctrica, que también son consumidos en otras actividades, debe hacerse el registro de dichos insumos mediante mediciones separadas del consumo asociado a estas otras actividades; caso contrario, el valor de Cfr tenderá a ser mayor que el de Cdr. Sin embargo, en la mayoría de las empresas diagnosticadas por el CPTS, se constata que dichas mediciones no se realizan en forma separada y, por lo tanto, el consumo de dichos insumos fuera del régimen de producción es alto comparado con el valor de Cdr; y dicho consumo se realiza principalmente fuera de la operación unitaria en cuestión, y no como parte de las intermitencias de la misma.

A partir de este último análisis, se evidencia la gran utilidad que tiene el modelo para determinar el valor del consumo específico en régimen (Cer), a fin de que la eficiencia de la operación unitaria dentro del

régimen de producción no se ve distorsionada por los altos consumos que se observan fuera de dicho régimen. Es decir, el valor global de C_e no refleja la verdadera eficiencia de la operación unitaria en régimen, ya que dicho valor es significativamente mayor que el valor de C_{er} ; ver ecuación (5).

Los altos consumos de agua, energía eléctrica y gas natural (o de GLP), fuera del régimen de producción, comparados con los consumos dentro de dicho régimen, representa una parte significativa de los gastos fijos de la mayoría de las empresas diagnosticadas por el CPTS. Estos gastos fijos son tanto más significativos cuanto menor es el volumen de la producción. Por ejemplo, el gasto fijo asociado al consumo de energía eléctrica en iluminación (incluye la iluminación de ambientes de la administración, almacenes y áreas externas de los edificios, entre otros), es más significativo para volúmenes pequeños de producción que para grandes volúmenes.

Por lo tanto, queda claro que el consumo fuera de régimen por unidad de producto disminuye conforme se incrementa el volumen de la producción, tal como se expresa en la ecuación (5). También queda claro que el costo fijo por unidad de producto disminuye conforme se incrementa el volumen de producción (es decir, este costo se distribuye sobre un mayor número de productos y, por ende, el costo específico por producto disminuye).

A continuación se demuestra que el consumo total de un insumo disminuye en términos absolutos al incrementar la intensidad de la producción (esto implica producir la misma cantidad promedio mensual de un producto, pero en menos tiempo (por ejemplo, un número menor de días por mes).

Para el efecto, la gráfica de la Figura 16 muestra el modelo general del comportamiento del consumo específico (C_e) en función del volumen de producción (V_p). La tendencia lineal de la gráfica corresponde a la ecuación que se muestra en la misma.

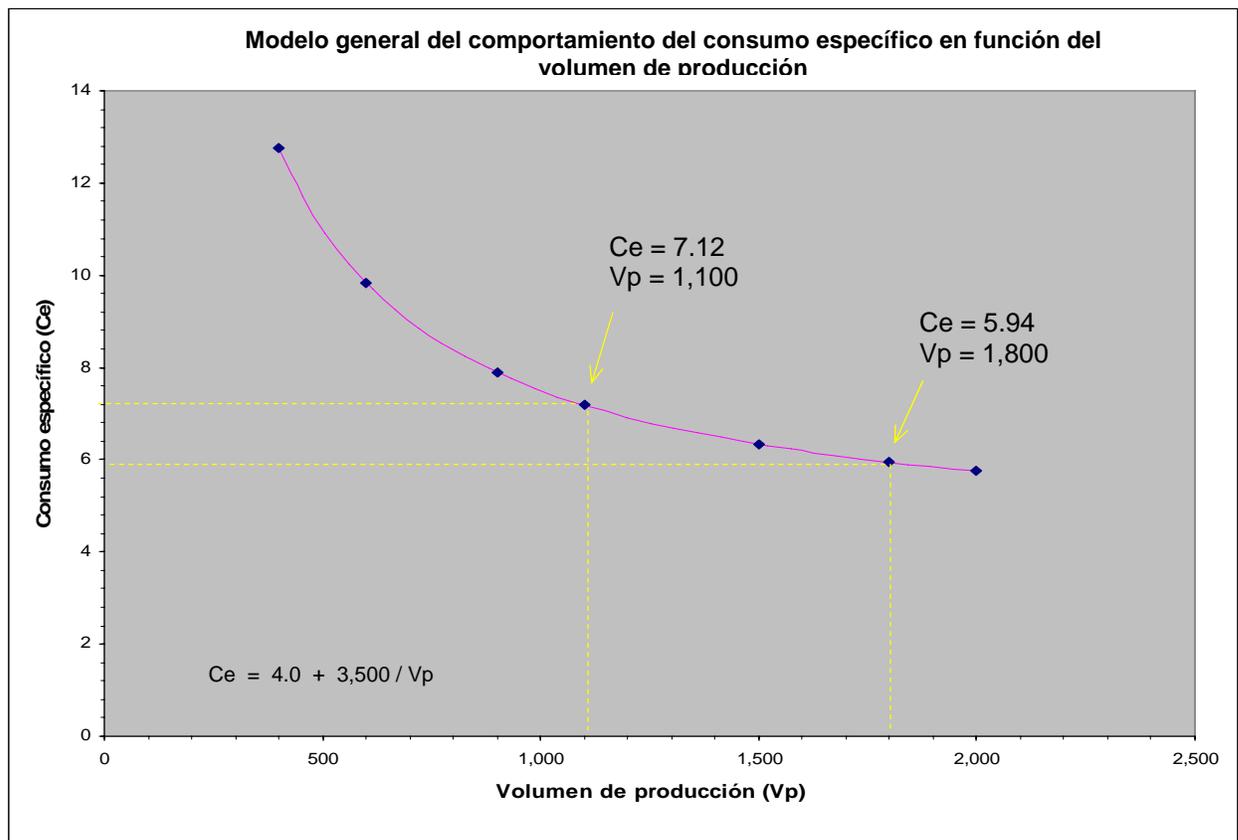


Figura 16. Modelo general del comportamiento del consumo específico (C_e) en función del volumen de producción (V_p). La tendencia lineal de la gráfica está ajustada con la ecuación (5).

Para la demostración que sigue, se asume lo siguiente (ver Figura 16):

- El volumen de producción promedio actual es de 1,100 unidades de producto por mes, con un consumo específico de un determinado insumo $C_e = 7.12$ unidades de insumo por unidad de producto.
- El número promedio de días de producción al mes, es de 25.
- El incremento de la intensidad de la producción a un equivalente de 1,800 unidades de producto por mes (la máxima capacidad nominal de producción es de 2,000 unidades de producto por mes), con un consumo específico $C_e = 5.94$ unidades de insumo por unidad de producto.

En base a estas asunciones, la producción promedio actual diaria es de 44 unidades de producto por día. Si la producción mensual se incrementa de 1,100 a 1,800 unidades de producto por mes, entonces la producción diaria se incrementaría de 44 a 72 unidades de producto por día.

Si, por razones de mercado, se desea que la producción mensual se mantenga en 1,100 unidades de producto por mes, pero se desea producir a razón de 72 unidades de producto por día, entonces la producción mensual deseada podría producirse en aproximadamente 15 días.

En base a esta información, se desea conocer el consumo total de un insumo para producir 1,100 unidades de producto por mes, pero bajo dos intensidades distintas de producción: una a razón de 44 unidades por día, durante 25 días, con un consumo específico para 25 días, $C_e(25d) = 7.12$ unidades de insumo (UI) por unidad de producto (UP); y, otra intensidad, a razón de 72 unidades por día, durante solo 15 días, con un consumo específico para 15 días, $C_e(15d) = 5.94$ UI / UP.

$$\begin{aligned} \text{Ct (25 días)} &= C_e(25d) \times V_p \\ &= (7.12 \text{ UI / UP}) \times (1,100 \text{ UP / mes}) \\ &= 7,832 \text{ UI / mes} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ct (15 días)} &= C_e(15d) \times V_p \\ &= (5.94 \text{ UI / UP}) \times (1,100 \text{ UP / mes}) \\ &= 6,534 \text{ UI / mes} \end{aligned}$$

La diferencia entre estos dos consumos totales de insumos, constituye un ahorro neto debido simplemente al cambio de intensidad de la producción:

$$\begin{aligned} \text{Ahorro neto mensual del insumo} &= \text{Ct (25 días)} - \text{Ct (15 días)} \\ &= (7,832 \text{ UI / mes}) - (6,534 \text{ UI / mes}) \\ &= 1,298 \text{ UI / mes} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje ahorro neto mensual} &= (1,298 \text{ UI / mes}) \times 100\% / (7,832 \text{ UI / mes}) \\ &= 16.6\% \end{aligned}$$

En resumen, y de acuerdo a un nuevo plan gerencial de operaciones, produciendo con mayor intensidad durante 15 días, se podría incluso dar vacaciones al personal de producción por el resto del mes, con el mismo salario, y la empresa ahorraría dinero (por supuesto, sería aún más beneficioso reprogramar las tareas del personal por el resto del mes).

Por otra parte, en la Figura 17 se muestra una gráfica que ilustra el efecto de mejorar la eficiencia productiva, mediante las siguientes acciones:

- Mejorando la eficacia del proceso o de una o varias operaciones unitarias, lo cual reduce el valor de C_e .
- Mejorando la gestión operativa, lo cual reduce el valor de C_f .

Partiendo de la situación inicial representada por la línea rosada en las gráficas de las Figuras 16 y 17, un análisis del efecto que tienen dichas acciones/mejoras sobre la eficiencia productiva, muestra que, para volúmenes de producción menores a 900 unidades de producto (ver la gráfica en la Figura 17), es más

importante reducir el valor de Cfr que el valor de Cer (línea azul); mientras que, para volúmenes de producción mayores a 900 unidades de producto, es más importante reducir el valor de Cer que el valor de Cfr (línea roja). Por supuesto, el máximo beneficio se logra reduciendo ambos valores (línea verde).

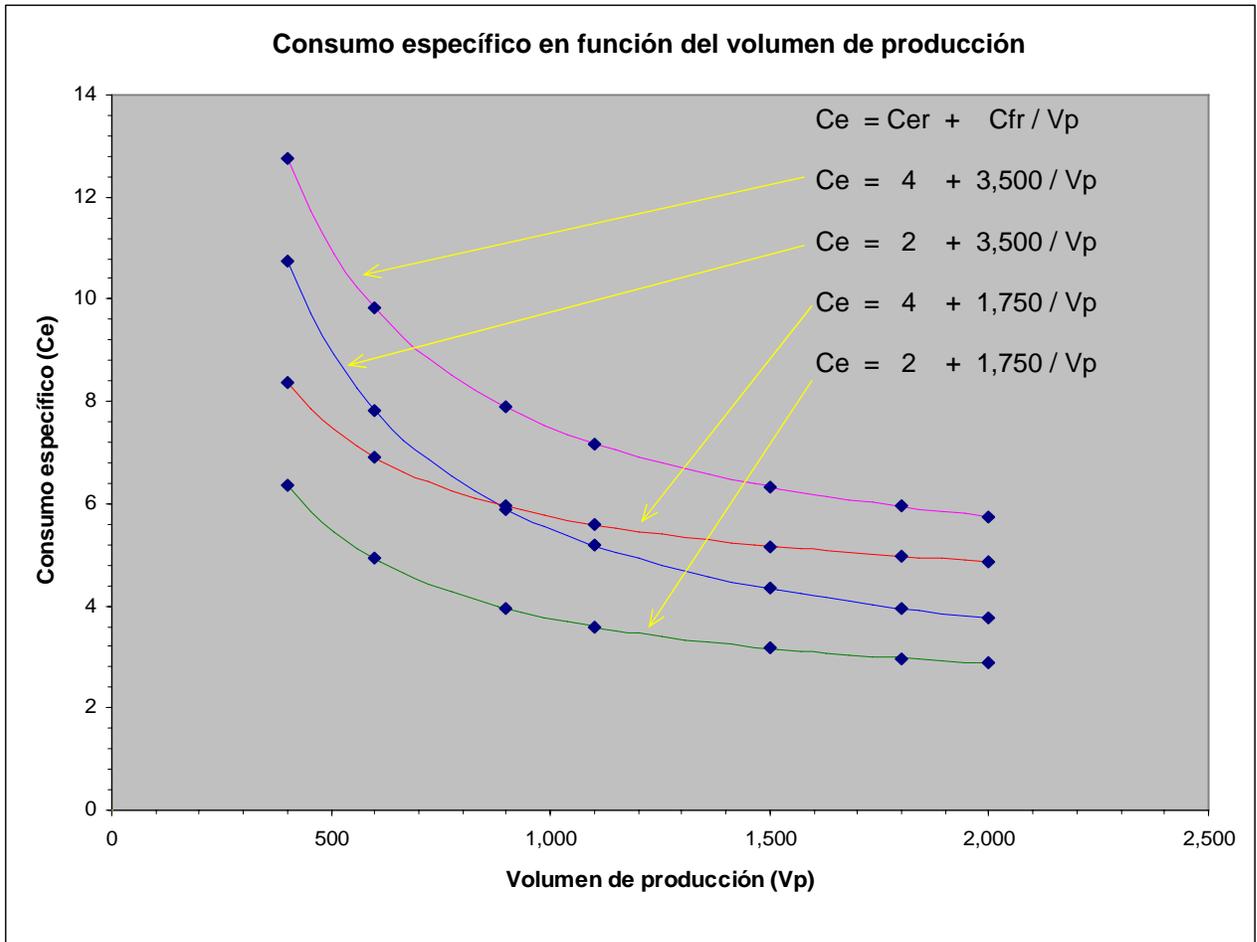


Figura 17. Gráfica de consumos específicos (Ce) en función del volumen de producción (Vp), con cuatro tendencias lineales, tres de las cuales resultan, por la mejora de la eficiencia productiva, en la reducción del valor de Cer y/o Cfr con relación a la cuarta tendencia lineal (de color rosado), que es la menos eficiente.

Por lo tanto, para cualquier volumen de producción, la primera tendencia lineal, mostrada en color verde, representa el comportamiento del régimen de producción más eficiente. Cabe hacer notar que, en base a esta tendencia lineal, el consumo específico global (Ce) puede ser reducido significativamente al intensificar la producción desde una producción mensual de 400 unidades de producto hasta unas 1,500 unidades de producto, a partir del cual la reducción de Ce es cada vez menos significativa.

Criterios de confiabilidad relacionados con valores negativos de Cer y Cfr

El consumo específico en régimen con valor negativo (por ejemplo, $Cer = -1.5$), es un caso muy especial que puede darse cuando uno de los insumos de la operación unitaria es, a la vez, un residuo que, por una parte, se genera en una cantidad que es proporcional al volumen de producción; y, por otra, se utiliza fuera del régimen de producción de la operación unitaria, sin importar que dicho insumo se utilice o no dentro del mismo régimen. Por supuesto, para que dichas afirmaciones sean válidas, es necesario que el residuo pueda ser recuperado para su uso como insumo.

Si se considera, por ejemplo, el caso de una materia prima que contiene agua y que es liberada durante la transformación de dicha materia prima en productos, el valor de C_{er} del agua, identificado en una gráfica, será negativo siempre y cuando:

- la operación unitaria requiera del consumo de una cierta cantidad de agua fuera del régimen de producción (caso contrario, el agua liberada por la materia prima sería simplemente un residuo más de la operación unitaria, y lo que cabría es el cálculo de una producción específica de agua, y no así un consumo específico de la misma).
- la cantidad de agua generada durante dicha transformación, es tanto mayor cuanto mayor sea el volumen de producción; y,
- tanto la cantidad de agua utilizada originalmente como insumo, o parte de la misma, junto con la cantidad de agua generada durante dicha transformación, o parte de la misma, pueda ser recuperada y reciclada como un insumo a ser utilizado fuera del régimen de producción (por ejemplo, para lavar la maquinaria y realizar la limpieza de pisos y ambientes en general), y cuya cantidad esté contabilizada como parte del consumo global asociado a la operación unitaria.

Cabe hacer notar que, cualquier excedente de agua producido por la operación unitaria, se convertiría en un producto adicional de la misma, como ocurriría con cualquier otro residuo generado por dicha operación unitaria. Estas ideas se aclaran con los datos imaginarios de C_{er} , C_{fr} y C_t mostrados en el Cuadro 4, junto con los valores positivos calculados de C_t y C_e .

Cuadro 4. Parámetros imaginarios de C_{er} , C_{fr} y V_p , para calcular C_t y C_e , correspondientes a una sola tendencia lineal.

Mes	Parámetros imaginarios			Parámetros calculados	
	C_{er}	C_{fr}	V_p	C_t	C_e
Mes 1			200	800	4.00
Mes 2			300	600	2.00
Mes 3	-2	1,200	400	400	1.00
Mes 4			500	200	0.40
Mes 5			600	0	0.00

A partir de un valor de C_{er} negativo (que implica la producción de un insumo), y para que el consumo total C_t y, por ende, el consumo específico total C_e , tengan valores positivos, es necesario que el consumo fuera de régimen, C_{fr} , sea mayor que el consumo en régimen, C_{dr} . Caso contrario, se tendría una producción específica del insumo, y no un consumo específico. Si los datos de V_p y de C_e del Cuadro 4 fueran los registrados por la empresa, una gráfica de los mismos permitiría identificar una tendencia lineal cuya ecuación estaría dada por:

$$C_e = -2 + 1,200 / V_p \quad (9)$$

Una situación similar es posible en el caso de una operación unitaria, en la que la transformación de la materia prima en productos es exotérmica, y donde el calor producido dentro del régimen de producción es recuperado y utilizado fuera del régimen de producción, al margen de que además pueda o no ser utilizado dentro del mismo régimen.

A continuación, se considera el caso de la existencia de valores negativos de C_{fr} , asociados a tendencias lineales identificadas a partir de datos de C_e (con valores positivos) graficados en función de V_p . Una ecuación general que representa este caso, es la siguiente:

$$C_e = C_{er} + C_{fr} / V_p \quad (10)$$

Un valor negativo de C_{fr} implicaría que el insumo está siendo producido fuera del régimen de producción, lo cual es un absurdo. Por ejemplo, si el insumo fuera un producto de otra operación unitaria, y dicho

producto se emplease como insumo de la operación unitaria en consideración, entonces dicho producto sería un producto intermedio del proceso constituido por las dos operaciones unitarias, y no un insumo de dicho proceso. Por lo tanto, para que el producto mencionado sea un insumo de la operación unitaria, dicho insumo debe contabilizarse como tal, independientemente de si fue producido mediante otra operación unitaria de la empresa, o fue adquirido por la misma. Es igualmente absurdo considerar que el insumo sea producido por las intermitencias de la operación unitaria.

Por otra parte, si el valor de Cfr es negativo, para que los valores de Ct y, por ende, de Ce, sean positivos, se requiere que el consumo dentro del régimen de producción (Cdr) sea mayor que el valor absoluto del consumo fuera del mismo (Cfr). A continuación se presenta un ejercicio con datos imaginarios de Cer, Cfr y Ct reportados en el Cuadro 5, junto con los valores calculados de Ct y Ce.

Cuadro 5. Parámetros imaginarios de Cer, Cfr y Vp, para calcular Ct y Ce, correspondientes a una sola tendencia lineal.

Mes	Parámetros imaginarios			Parámetros calculados	
	Cer	Cfr	Vp	Ct	Ce
Mes 1			600	0	0.00
Mes 2			1,000	800	0.80
Mes 3	2	- 1,200	2,000	2,800	1.40
Mes 4			3,000	4,800	1.60
Mes 5			4,000	6,800	1.70

Por lo tanto, si los datos de Vp y de Ce del Cuadro 5 fueran los registrados por la empresa, una gráfica de los mismos permitiría identificar una tendencia lineal cuya ecuación estaría dada por:

$$Ce = 2 - 1,200 / Vp \quad (11)$$

El valor negativo de Cfr (-1,200) de la ecuación (11), implicaría que el insumo está siendo producido fuera del régimen de producción, lo cual es un absurdo. Sin embargo, por causas asociadas a la forma incorrecta de registrar datos de consumo de un insumo determinado durante el período en el que se realiza el proceso de producción (o la operación unitaria), puede ocurrir que la gráfica de Ce en función de Vp obtenida a partir de dichos datos genere tendencias lineales con valores negativos de Cfr.

Para demostrar la validez de esta afirmación, se examina un caso real observado por el CPTS en una fábrica de helados. Un sistema de refrigeración enfría los moldes que contiene el producto hasta que éste queda congelado. Esto se logra haciendo circular los moldes del helado por una salmuera, preparada con cloruro de calcio hidratado con dos moléculas de agua ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en adelante, cloruro de calcio, contenida en un tanque, que permite llegar a una temperatura aproximada de -30°C .

Cuando los moldes salen del tanque, arrastran consigo una cantidad determinada de salmuera, que luego se pierde durante el lavado de los moldes, lo que obliga a reponer la salmuera del tanque en forma periódica (cada día), y en forma proporcional a la cantidad de helado producida. En consecuencia, éste es un consumo que es proporcional al volumen de producción y es equivalente a un consumo dentro del régimen de producción, aunque en la práctica se realice fuera del mismo (es decir, la pérdida y reposición de salmuera, es proporcional a la cantidad de moldes que pasan por el tanque y arrastran salmuera y, por lo tanto, es proporcional a la cantidad producida de helado).

Por otra parte, una o dos veces al año se realiza la limpieza del tanque de salmuera, la que es desechada, y el sistema de refrigeración arranca con salmuera renovada. Esta reposición de salmuera constituye, en ese mes, un consumo fuera del régimen de producción, y es una cantidad adicional a la que se consume en régimen por las pérdidas del arrastre de salmuera que ocurre durante la producción. Por lo tanto, el consumo total en ese mes es alto comparado con el consumo total del resto de los meses en los que no se realiza dicha limpieza.

En base a los datos registrados del consumo de cloruro de calcio y de la producción de helado, en la Figura 18 se muestra una gráfica del consumo específico de cloruro de calcio en función de la cantidad mensual de helado producido. Nueve de los doce puntos de la gráfica de la Figura 18 están correlacionados en tres tendencias lineales del Tipo 3. De ellas, la primera y segunda tendencias muestran tener un valor negativo de Cfr.

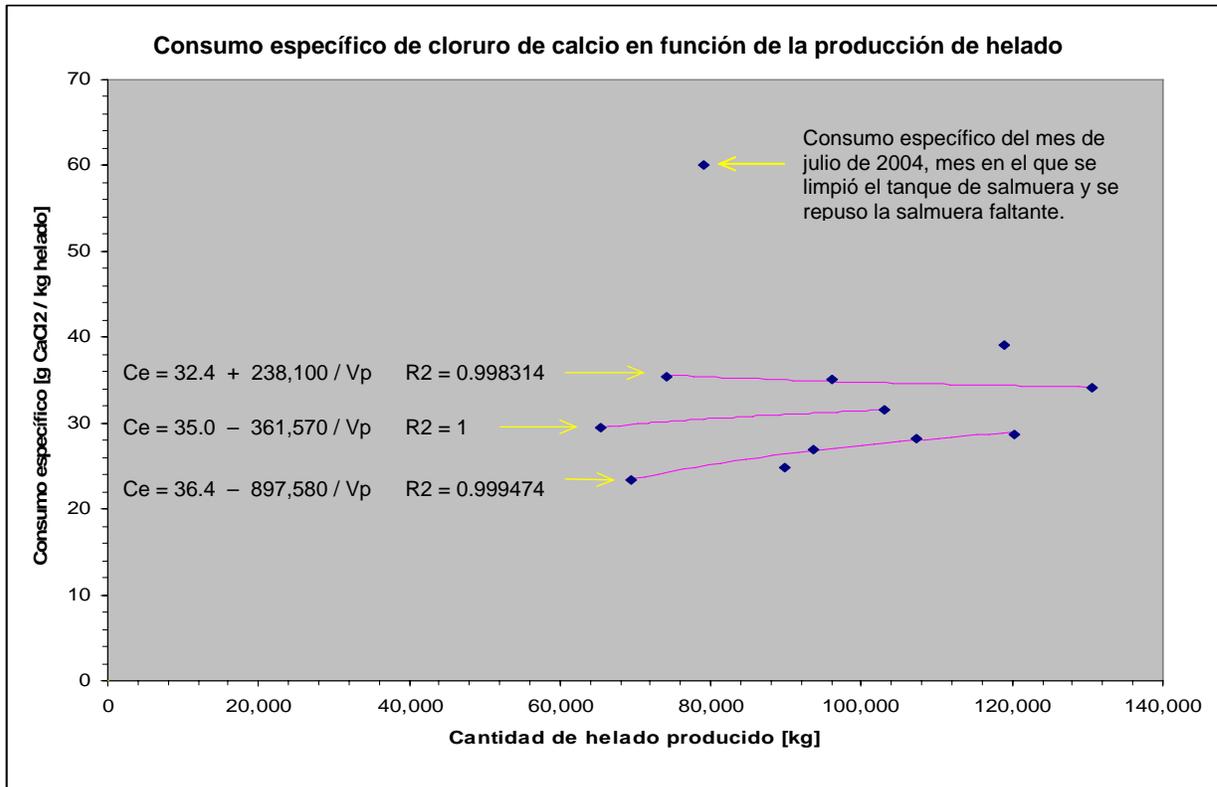


Figura 18. Consumo específico de cloruro de calcio hidratado con dos moléculas de agua, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, expresado en [g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ / kg helado], en función del volumen de producción mensual de helado, expresado en [kg de helado / mes].

A continuación, se presenta algunas conclusiones sobre el comportamiento de Ce en función de Vp correspondiente a las tendencias lineales de la gráfica de la Figura 18:

- El consumo específico del mes de julio de 2004 es notoriamente elevado (60 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ /kg helado), debido a que se preparó un nuevo baño de salmuera, además de reponer la pérdida de salmuera en régimen durante la producción del mes.
- Los valores de Cer de las tres tendencias lineales identificadas (del Tipo 3), sugieren la existencia de un único régimen de producción, con un promedio ponderado de $Ce_r = 34.8$ g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ /kg helado (el valor anual de Ce es igual a 33.0 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ /kg helado).
- El valor negativo de Cfr, correspondiente a las dos tendencias inferiores, sugiere que las reposiciones de salmuera se realizaron con cantidades menores de cloruro de calcio que las que se perdieron por el arrastre de dicha salmuera. Es decir, en los meses correspondientes a estos puntos de la gráfica, se registró un consumo de cloruro de calcio equivalente a la cantidad de salmuera repuesta, y no a la cantidad de salmuera verdaderamente consumida, ya que se consumió, además de la cantidad repuesta, una parte de la salmuera de base preparada en un mes previo. Cabe hacer notar que, si la cantidad de la reposición hubiera sido igual a la de las pérdidas por arrastre, el valor de Cfr hubiese sido igual a cero.

- El valor positivo de Cfr de la tercera tendencia, sugiere que las reposiciones de salmuera se realizaron con cantidades mayores de cloruro de calcio que las que se perdieron por el arrastre de dicha salmuera. A su vez, esto implica que, durante los tres meses, no consecutivos, correspondientes a los tres puntos de la tercera tendencia, hubo necesidad de aumentar la cantidad de salmuera, debido a que en otros meses, correspondientes a los puntos de las dos primeras tendencias, se consumió más de lo repuesto y, en consecuencia, se disminuyó la cantidad de salmuera contenida en el tanque.

Por lo tanto, si bien los valores negativos de Cfr son físicamente inaceptables, es posible observarlos cuando el consumo fuera de régimen es prácticamente despreciable, y el consumo de base (es decir, la salmuera de partida) no es registrado como un consumo del mes en el cual se realiza (ya que el registro de su consumo se realizó en algún mes pasado; en este caso, en el mes de julio de 2004).

Cuando se obtiene valores negativos ya sea de Cer o de Cfr, primeramente, se debe buscar las razones fenomenológicas que expliquen este comportamiento. De no existir una razón fenomenológica que justifique esos valores negativos, se los debe rechazar y se debe buscar la correlación de otro conjunto de puntos en la gráfica, cuyas tendencias lineales posean valores positivos tanto de Cer como de Cfr.

A continuación se examina la probabilidad de que varios de los puntos contenidos en una gráfica de Ce en función de Vp, pertenecientes a distintas tendencias lineales, puedan fortuitamente coincidir para formar otras tendencias lineales, las cuales, en la realidad, no representan a régimen de producción alguno.

Para el efecto, en el Cuadro 6 se presenta datos de Ct calculados a partir de datos imaginarios de Cer, Cfr y Vp, junto con datos de Ce calculados a partir de Ct y Vp mediante la ecuación (2). Los datos imaginarios mencionados fueron elegidos de manera tal que, por una parte, se tenga un mismo régimen de producción (i.e. valores iguales de Cer) pero tres distintas tendencias lineales (i.e. con tres valores distintos de Cfr); y, por otra parte, en la gráfica de Ce en función de Vp, varios de los puntos pertenecientes a distintas tendencias lineales formen otras tendencias lineales, con valores de Cer y de Cfr distintos de los valores de cualquiera de las tres tendencias originales. Para lograr este último propósito, fue además necesario elegir volúmenes de producción mensual que sean proporcionales a los valores de Cfr, ya que, caso contrario, no es posible que ocurran las coincidencias necesarias para lograr el mencionado propósito.

Cuadro 6. Datos calculados de Ct a partir de datos imaginarios de Cer, Cfr y Vp. En la última columna, se reporta los correspondientes valores de Ce, calculados a partir de los datos imaginarios de Ct y Vp.

Régimen de producción	Mes	Valores imaginarios			Ct	Ce
		Cer	Cfr	Vp		
Régimen 1.a	Mes 1	1.8	200	100	380	3.80
	Mes 2			200	560	2.80
	Mes 3			300	740	2.47
	Mes 4			400	920	2.30
	Mes 5			500	1,100	2.20
Régimen 1.b	Mes 6	1.8	500	200	860	4.30
	Mes 7			300	1,040	3.47
	Mes 8			400	1,220	3.05
Régimen 1.c	Mes 9	1.8	800	100	980	9.80
	Mes 10			200	1,160	5.80
	Mes 11			300	1,340	4.47
	Mes 12			400	1,520	3.80
	Mes 13			500	1,700	3.40

En la gráfica de la Figura 19, se muestra tres tendencias lineales dibujadas en color rosado. Estas tendencias corresponden al régimen de producción originalmente diseñado en el Cuadro 6 (i.e. con Cer = 1.8). Sin embargo, se identifican dos regímenes de producción adicionales, cada uno con tres tendencias

lineales (tres en color azul y tres en color amarillo). Las tendencias lineales en color azul poseen valores negativos de C_{er} , y valores positivos de C_{fr} ; por su parte, las tendencias lineales en color amarillo poseen valores positivos de C_{er} , y valores negativos de C_{fr} . En este caso, las tendencias en color azul y amarillo deben ser rechazadas, y quedan para el análisis solamente las tendencias en color rosado.

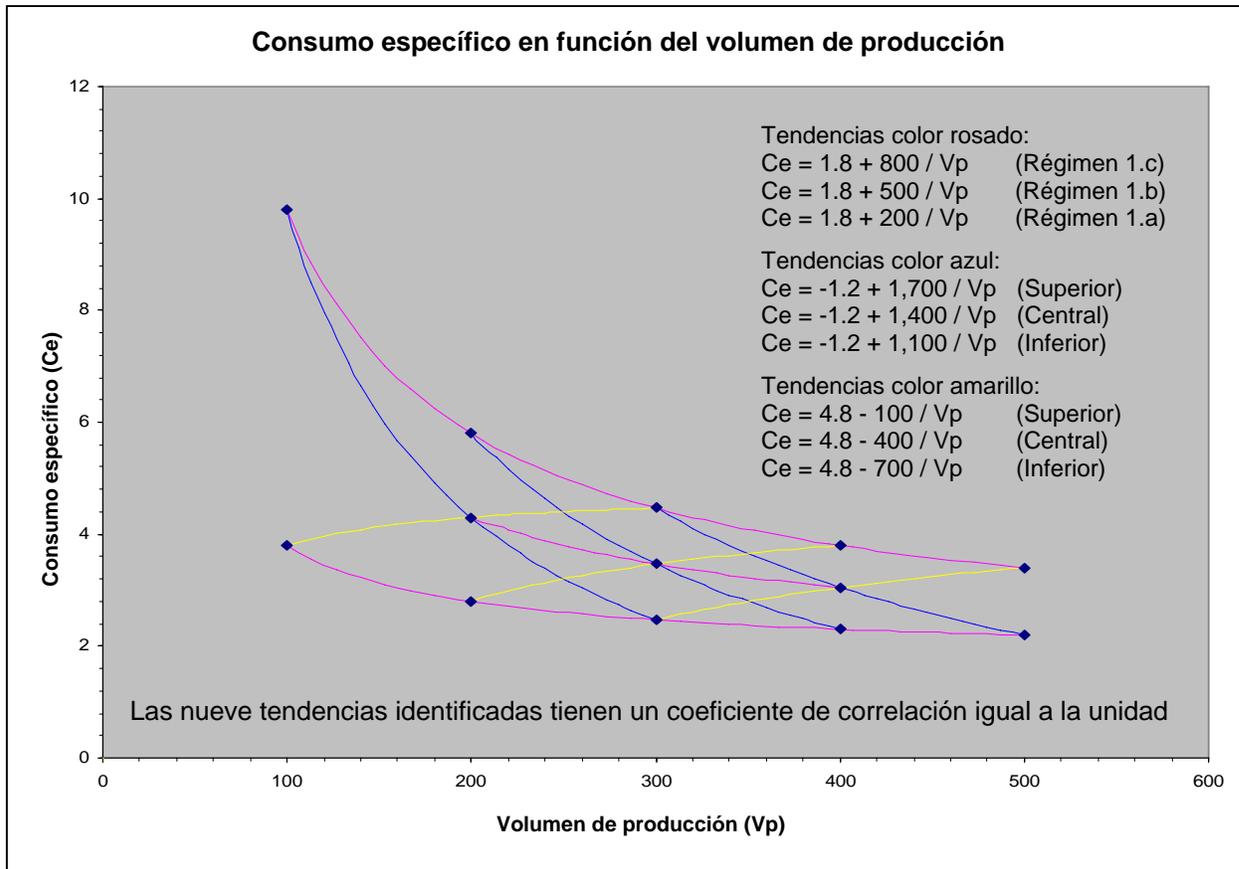


Figura 19. A partir de los 13 puntos que conforman las tres tendencias lineales dibujadas en color rosado (con régimen $C_{er} = 1.8$; ver Cuadro 6), se identifican dos regímenes adicionales, cada uno con tres tendencias lineales (tres en color azul y tres en color amarillo); y todas con un coeficiente de correlación igual a la unidad.

Cabe hacer notar que, en ausencia de proporcionalidad entre los valores de C_{fr} y de V_p , desaparecen las coincidencias para formar una nueva tendencia lineal a partir de puntos contenidos en otras tendencias lineales.

Por lo tanto, se concluye que la probabilidad de identificar nuevas tendencias lineales, a partir de los puntos contenidos en tendencias lineales que pertenecen a un régimen de producción, es tanto más baja cuanto menor sea la proporcionalidad de los valores de C_{fr} y de V_p . Queda claro que la probabilidad de que ocurra dicha proporcionalidad es muy baja, por lo que es muy poco probable poder identificar dos regímenes de producción distintos a partir de un mismo conjunto de puntos contenidos en una gráfica. No obstante, si esto llega a ocurrir, la única manera para verificar cuál es el conjunto de tendencias que representa al régimen de producción es mediante una verificación en planta.

En las gráficas de la Figura 20, se muestra un caso real, en el que un mismo conjunto de puntos de una gráfica de consumos específicos de gas natural en función de la producción de helado, proporciona dos pares de tendencias lineales que representan regímenes de producción distintos.

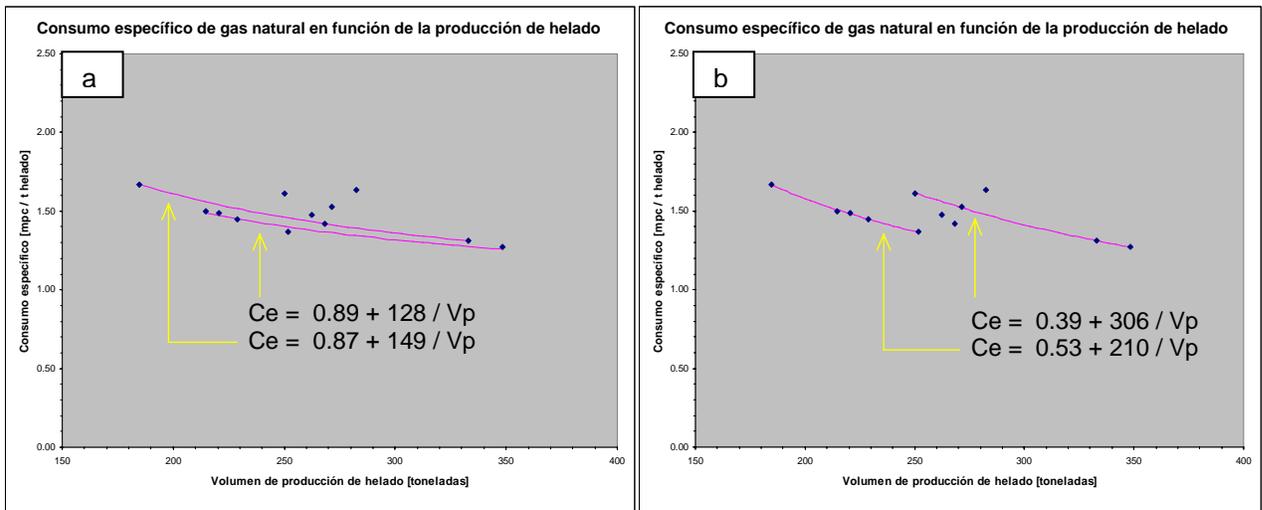


Figura 20. Gráficas del consumo específico de gas natural en función del volumen de producción de helado: a) se identifican dos tendencias lineales del Tipo 1; b) con los mismos puntos de la gráfica (a), se identifican otras dos tendencias lineales del Tipo 2.

En la gráfica (a) de la Figura 20, las dos tendencias lineales identificadas son del Tipo 1, y corresponden a un régimen de producción cuyo valor de C_{er} es igual a 0.89 mpc/t. Por coincidencia, y con los mismos puntos de la gráfica (a), en la gráfica (b) se pudo identificar otras dos tendencias lineales distintas, las cuales están bastante bien correlacionadas en forma individual. Sin embargo, estas últimas son del Tipo 2, ya que sus valores de C_{er} son significativamente distintos entre sí. Por lo tanto, si bien pudo darse la coincidencia de hallar un par de tendencias lineales distintas con el mismo grupo de puntos, dicha coincidencia no fue suficiente como para obtener dos tendencias con el mismo valor de C_{er} (a fin de reproducir tendencias confiables del Tipo 1) o, por lo menos, con similares valores de C_{er} (para dar tendencias también confiables del Tipo 3). Si esta coincidencia adicional hubiese sido posible, la única forma de discernir entre los dos pares distintos de tendencias lineales era mediante la verificación del valor de C_{er} en planta.

Modelo rectilíneo empleado como método auxiliar para la identificación de tendencias lineales inversas

Cuando no se tiene mucha práctica, la identificación de tendencias lineales inversas a partir de gráficas de C_e en función de V_p puede ser, en algunos casos, dificultosa. Una forma de facilitar dicha identificación es mediante el uso del modelo rectilíneo, el cual está basado en el comportamiento rectilíneo que tiene el consumo total (C_t) en función del volumen de producción (V_p). Este comportamiento está representado por una ecuación rectilínea, la cual se obtiene después de reemplazar C_{dr} de la ecuación (8) en la ecuación (1):

$$C_t = C_{er} \times V_p + C_{fr} \quad (12)$$

Nótese que la ecuación (12) es rectilínea y que sus coeficientes C_{er} y C_{fr} son los mismos que los coeficientes de la ecuación (5), que es una ecuación lineal inversa. Nótese también que el consumo total, C_t , es proporcional al volumen de producción, V_p . Si se utiliza los datos del Cuadro 1 para graficar C_t en función de V_p , y los puntos correspondientes a los dos regímenes de dicho cuadro son ajustados mediante la ecuación (12), se obtiene la gráfica de la Figura 21.

En la gráfica de la Figura 21 se identifican cuatro tendencias rectilíneas, cuyos coeficientes hallados mediante el ajuste de dichas tendencias con la ecuación (12) reproducen los valores de C_{er} y de C_{fr} del Cuadro 1. Con este modelo, C_{er} es la pendiente de la recta, y C_{fr} es el valor de la intersección de dicha recta con el eje de las ordenadas.

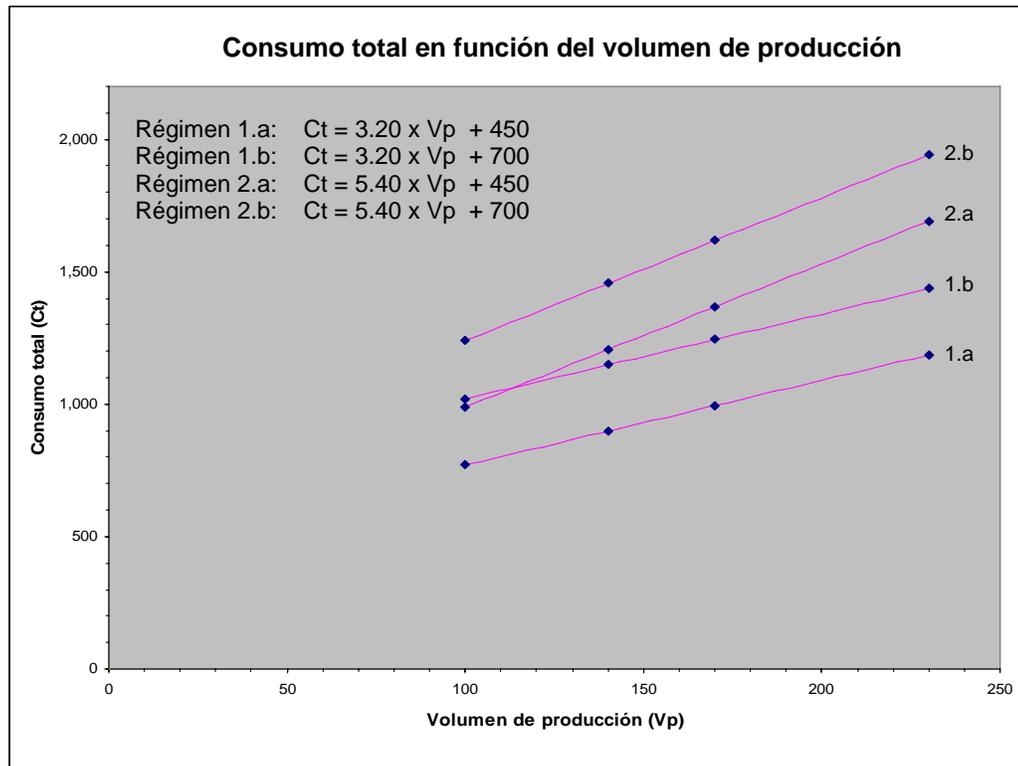


Figura 21. Tendencias rectilíneas ajustadas con la ecuación (12), correspondientes a los dos casos (a y b) de cada uno de los dos regímenes de producción descritos en el Cuadro 1. El valor de los coeficientes de cada ecuación reproduce los valores de Cfr y Cer del Cuadro 1.

El modelo rectilíneo, representado mediante la ecuación (12), hace que sea más sencilla la identificación de tendencias rectilíneas, cuyos puntos son equivalentes a los de las tendencias lineales inversas, por lo que éstas también quedan identificadas. La sencillez en la identificación de tendencias rectilíneas mediante la ecuación 12, radica en lo siguiente:

- Los puntos correspondientes a una tendencia rectilínea están ubicados a lo largo de una línea recta, cuya pendiente es Cer, y cuya intersección con el eje de las coordenadas es Cfr.
- Debido a que es muy sencillo visualizar la proyección de una línea recta hacia su intersección con el eje de las coordenadas, es fácil descartar las líneas rectas cuya intersección tienen un valor de Cer negativo (ver la Sección anterior de este documento).
- Las tendencias rectilíneas que pertenecen a un mismo régimen de producción (i.e. que poseen el mismo valor de Cer), son líneas rectas y paralelas entre sí, de manera que, una vez identificada una primera tendencia rectilínea cualquiera, es fácil identificar el resto de las tendencias rectilíneas que pudiesen existir (es decir, es fácil identificar puntos que están alineados a lo largo de una recta, la cual además es paralela a una recta previamente identificada).

Una vez identificadas las tendencias rectilíneas de la gráfica de Ct en función de Vp, el grupo de puntos pertenecientes a cada una de dichas tendencias rectilíneas sirve para identificar los puntos equivalentes en las tendencias lineales inversas de la gráfica de Ce en función de Vp.

Ventajas y desventajas de los modelos rectilíneo y lineal inverso

La mayor aplicación del modelo rectilíneo es su uso como método auxiliar para la identificación de tendencias lineales inversas asociadas a uno o más regímenes de producción. Sin embargo, el modelo rectilíneo no es adecuado para interpretar el comportamiento de la eficiencia operativa de un determinado régimen de producción, ni para realizar el análisis visual de los siguientes aspectos:

- Debido a que una tendencia lineal inversa es una representación gráfica de la variación del consumo específico (C_e) en función del volumen de producción (V_p), dicha tendencia permite una visualización directa del comportamiento de la eficiencia productiva de una operación unitaria en función del volumen de producción. Este aspecto, por ejemplo, permite apreciar, en forma visual, la capacidad ociosa de una operación unitaria y, en algunos casos, las deficiencias de la gestión productiva como causas del desperdicio de un insumo, ya sea durante las intermitencias operativas o, incluso, fuera de la propia operación unitaria.
- La forma intrínseca de las tendencias lineales inversas y la disposición gráfica de unas respecto de otras, permite identificar ciertas causas de ineficiencias productivas en forma visual.
- El número, distribución y ubicación de los puntos no correlacionados de una gráfica de C_e en función de V_p , también permite identificar ciertas causas de ineficiencias productivas en forma visual.

Si bien el análisis de estos tres aspectos está fuera del alcance del presente documento, la experiencia del CPTS muestra que dichos aspectos del modelo lineal inverso son muy difíciles, y quizás imposibles, de visualizar con el modelo rectilíneo, ya que en este último se visualiza el comportamiento del consumo total (C_t), y no el del consumo específico (C_e), siendo este último un parámetro muy importante para medir la eficiencia productiva.

Finalmente, es necesario advertir sobre un defecto inherente a los dos modelos, por el cual el valor de C_{er} hallado a partir de las tendencias lineales resulta ser mayor que el valor real del consumo específico en régimen. Este es un error por exceso que se manifiesta cuando existe el consumo de un insumo fuera de régimen, y una parte de dicho consumo resulta ser fortuitamente proporcional al volumen de producción (V_p). Un consumo fortuitamente proporcional al volumen de producción se refleja en la magnitud del consumo específico en régimen (C_{er}) y no así en la del consumo fuera de régimen (C_{fr}). Por lo tanto, el incremento del valor de C_{er} se produce a expensas del valor de C_{fr} , por lo que el valor de este último resulta ser menor que el valor del consumo real fuera de régimen.

Si bien existe una baja probabilidad de que esta proporcionalidad fortuita ocurra entre C_{fr} y V_p , es importante tomarla en cuenta al momento de realizar la verificación en planta para validar el valor de C_{er} . En particular, la probabilidad de que ocurra un consumo fuera de régimen en forma proporcional al volumen de producción, se incrementa sobre todo cuando el registro del consumo no se realiza en forma separada del resto de las actividades de la empresa, en las cuales se consumen los mismos insumos que se consumen en la operación unitaria. Un ejemplo típico es la energía eléctrica, cuyo consumo se comparte con otras actividades de la empresa y que, en la mayoría de los casos examinados por el CPTS, se registra en forma global. Por lo tanto, el error cometido al hallar los valores de C_{er} y de C_{fr} mediante cualquiera de los dos modelos, por efecto de un consumo fuera de régimen proporcional al volumen de producción, puede minimizarse si el registro de datos de consumo y de producción se realiza en forma separada del consumo de insumos en otras operaciones unitarias y/o actividades de la empresa.

Nota: Para hallar una o más tendencias lineales a partir de datos contenidos en una misma gráfica, el CPTS ha desarrollado un programa de computadora en Visual Basic, denominado "CPTS-GRAF", que opera bajo el Microsoft Excel. Si usted desea adquirir dicho programa, o si desea obtener mayor información sobre sus aplicaciones, diríjase a la siguiente dirección de correo electrónico: direccion.ejecutiva@cpts.org