

CAPÍTULO 6

EMISIONES DE LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA

Autores

Scott Bartos (Estados Unidos)

Laurie S. Beu (Estados Unidos), C. Shepherd Burton (Estados Unidos), Charles L. Fraust (Estados Unidos), Francesca Illuzzi (Italia), Michael T. Mocella (Estados Unidos) y Sebastien Raoux (Francia/Estados Unidos)

Autores colaboradores

Guido Agostinelli (Italia), Erik Alsema (Países Bajos), Seung-Ki Chae (República de Corea), Vasilis M. Fthenakis (Estados Unidos), Joseph Van Gompel (Estados Unidos), Hideki Nishida (Japón), Takayuki Oogoshi (Japón) y Kurt T. Werner (Estados Unidos)

Índice

6	Emisiones de la industria electrónica	6.5
6.1	Introducción	6.5
6.2	Cuestiones metodológicas.....	6.6
6.2.1	Elección del método	6.6
6.2.1.1	Decapado y limpieza por CVD de semiconductores, pantallas de cristal líquido y dispositivos fotovoltaicos.	6.6
6.2.1.2	Fluidos de transferencia térmica	6.15
6.2.2	Elección de los factores de emisión.....	6.17
6.2.2.1	Decapado y limpieza por CVD de semiconductores, pantallas de cristal líquido y dispositivos fotovoltaicos.	6.17
6.2.2.2	Fluidos de transferencia térmica	6.25
6.2.3	Elección de los datos de la actividad	6.25
6.2.4	Exhaustividad	6.28
6.2.5	Desarrollo de una serie temporal coherente.....	6.29
6.3	Evaluación de incertidumbre	6.29
6.3.1	Incertidumbres del factor de emisión	6.30
6.3.2	Incertidumbres en los datos de la actividad.....	6.30
6.4	Garantía de calidad/Control de calidad (GC/CC), generación de informes y documentación	6.33
6.4.1	Garantía de calidad / Control de calidad (GC/CC).....	6.33
6.4.2	Generación de informes y documentación	6.33
Referencias	6.35

Ecuaciones

Ecuación 6.1	Método de Nivel 1 para la estimación del conjunto de emisiones de CF.....	6.10
Ecuación 6.2	Método de Nivel 2a para estimar las emisiones de CF	6.11
Ecuación 6.3	Emisiones de producto derivado CF_4	6.11
Ecuación 6.4	Emisiones de producto derivado C_2F_6	6.11
Ecuación 6.5	Emisiones de producto derivado CHF_3	6.11
Ecuación 6.6	Emisiones de producto derivado C_3F_8	6.12
Ecuación 6.7	Método de Nivel 2b para estimar las emisiones de CF	6.12
Ecuación 6.8	Emisiones de producto derivado CF_4	6.13
Ecuación 6.9	Emisiones de producto derivado C_2F_6	6.13
Ecuación 6.10	Emisiones de producto derivado CHF_3	6.13
Ecuación 6.11	Emisiones de producto derivado C_3F_8	6.14

Ecuación 6.12	Método de Nivel 1 para estimar el total de emisiones de los CF generadas por los fluidos de transferencia térmica	6.15
Ecuación 6.13	Método de Nivel 2 para estimar las emisiones de los CF generadas por los fluidos de transferencia térmica	6.16

Figuras

Figura 6.1	Árbol de decisión para la estimación de las emisiones de los CF generadas por la fabricación de productos electrónicos.....	6.9
Figura 6.2	Árbol de decisión para la estimación de las emisiones de los CF generadas por las pérdidas de fluidos de transferencia térmica en la fabricación de productos electrónicos.	6.17

Cuadros

Cuadro 6.1	Fuentes de información necesarias para completar los métodos de estimación de emisiones por niveles para la fabricación de componentes electrónicos.....	6.8
Cuadro 6.2	Factores de emisión de Nivel 1 específicos de los gases para las emisiones de CF generadas por la fabricación de productos electrónicos.....	6.18
Cuadro 6.3	Factores de emisión por defecto de Nivel 2 para las emisiones de CF generadas por la fabricación de semiconductores.....	6.20
Cuadro 6.4	Factores de emisión por defecto de Nivel 2 para las emisiones de CF generadas por la fabricación de LCD.....	6.21
Cuadro 6.5	Factores de emisión por defecto de Nivel 2 para las emisiones de CF generadas por la fabricación de PV.....	6.22
Cuadro 6.6	Parámetros de eficiencia por defecto de Nivel 2a y 2b para las tecnologías de reducción de las emisiones de los CF en la industria electrónica	6.23
Cuadro 6.7	Capacidades totales de diseño de silicio y de vidrio por país para 2003, 2004 y 2005.....	6.27
Cuadro 6.8	Capacidad total de producción de PV por país para 2003.....	6.28
Cuadro 6.9	Estimaciones por defecto de los errores relativos (%) de Nivel 2 asociados a los factores de emisión de CF para la fabricación de semiconductores, con un intervalo de confianza del 95 por ciento	6.31
Cuadro 6.10	Estimaciones por defecto de los errores relativos (%) de Nivel 2 asociados a los factores de emisión de los CF para la fabricación de LCD, con un intervalo de confianza del 95 por ciento	6.32
Cuadro 6.11	Información necesaria para una transparencia total de las estimaciones de las emisiones provenientes de la fabricación de productos electrónicos.....	6.34

Recuadro

Recuadro 6.1	Ejemplo para la fabricación de semiconductores.....	6.15
--------------	---	------

6 EMISIONES DE LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA

6.1 INTRODUCCIÓN

Varios procesos de fabricación de la electrónica avanzada utilizan compuestos fluorados (CF) para realizar intrincados patrones de circuitos mediante decapado por plasma, para limpiar las cámaras de reacción y para controlar la temperatura. Los sectores específicos de la industria electrónica que se analizan en este capítulo incluyen la fabricación de semiconductores, pantallas planas a transistores de película delgada (TFT-FPD, del inglés, *thin-film-transistor flat panel display*) y dispositivos fotovoltaicos (PV, del inglés, *photovoltaic*) (denominados genéricamente «industria electrónica».¹

Actualmente, la industria electrónica emite por igual, CF gaseosos y CF líquidos a temperatura ambiente. Entre estos gases están incluidos los compuestos CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $c-C_4F_8$, $c-C_4F_8O$, C_4F_6 , C_5F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , trifluoruro de nitrógeno (NF_3) y hexafluoruro de azufre (SF_6), que se usan en dos etapas importantes de la fabricación de productos electrónicos: (i) el decapado por plasma de los materiales que contienen silicio y (ii) la limpieza de las paredes de las cámaras de deposición química en fase de vapor (CVD, del inglés, *chemical vapour deposition*), donde se ha depositado el silicio.² La mayoría de las emisiones de los CF resultan de una limitada eficiencia de utilización (vale decir, del consumo) de los precursores de los CF durante el proceso de decapado y de limpieza. Además, una fracción de los compuestos fluorados utilizados en el proceso de producción pueden convertirse en producto derivado CF_4 y, en algunos casos, en C_2F_6 , CHF_3 y C_3F_8 .³ Por igual, debe tomarse en cuenta la formación de CF_4 como producto derivado del decapado y de la limpieza de materiales de constante dieléctrica reducida (bajo-k) que contienen carbono (o carburo).⁴ Asimismo, el uso de F_2 , COF_2 , y ClF_3 puede aumentar. Estos gases, aunque no contribuyen por sí mismos al calentamiento atmosférico, bajo ciertas condiciones pueden conducir a la formación de CF_4 .

Los fabricantes de productos electrónicos utilizan los CF para controlar la temperatura durante algunos procesos. Conocidos también como fluidos de transferencia térmica, estos CF son líquidos a temperatura ambiente y poseen presiones de vapor considerables. Las pérdidas por evaporación contribuyen a las emisiones totales de CF. Estas pérdidas se producen durante el enfriamiento de ciertos equipos del proceso, durante los ensayos de los dispositivos de semiconductores encapsulados y durante la soldadura por reflujo en fase vapor de los componentes electrónicos de los circuitos integrados. Aparentemente, las pérdidas por evaporación no ocurren cuando se utilizan los CF líquidos para enfriar los componentes electrónicos ni los sistemas durante la operación. En este tipo de aplicación, los CF líquidos permanecen confinados en sistemas cerrados a lo largo de la vida útil

¹ Recientes estudios exhaustivos realizados por los fabricantes europeos y estadounidenses de PV indican que entre un 40 y un 50 por ciento de los fabricantes de PV usan cantidades relativamente pequeñas de CF (donde el CF_4 predomina durante el decapado de las pastillas de silicio cristalino y el C_2F_6 durante la limpieza de la cámara después de la deposición de las películas de $SiNx$). Según estos estudios, que datan del 2004, la utilización mundial de CF_4 era aproximadamente de 30 Mtoneladas. Aunque el uso mundial de los CF pareciera bajo en 2004, unos pronósticos fiables indican un crecimiento de la industria de PV de aproximadamente un 30 por ciento anual (y más) para el futuro cercano. Más aún, varios informes exaltan las virtudes del uso de los CF como medio de aumentar la productividad de la fabricación y de disminuir los costos para las tecnologías basadas en el silicio (Shah *et al.*, 2004; Maycock, 2005; Agostinelli *et al.*, 2004 y Rentsch *et al.*, 2005). Tales tasas esperadas de crecimiento y la perspectiva de aumento en el uso de los CF constituyen una motivación para incluir en este capítulo las emisiones de CF originadas por la fabricación de PV.

² En este capítulo se analizan las emisiones de C_3F_8 aunque a este compuesto no se le haya asignado un potencial de calentamiento atmosférico (PCA) reconocido por el IPCC. El C_3F_8 es un gas de efecto invernadero directo y las emisiones pueden estimarse empleando los métodos y los datos que se describen en este capítulo. La vida media del C_3F_8 atmosférico es de aproximadamente 1 año, lo cual arroja un PCA relativamente bajo (Sekiya, 2003).

³ Se han observado emisiones de C_2F_6 como producto derivado a partir de la descomposición de las moléculas de C_4F_6 y éstas pueden ocurrir para otras moléculas de CF con más de dos átomos de carbono. Nótese que para la mayoría de los precursores de CF, no se ha observado la formación de C_2F_6 como producto derivado. Se ha declarado la formación de CHF_3 cuando se usa el $c-C_4F_8$ como decapante en la fabricación de TFT-FPD y se han declarado emisiones de C_3F_8 como producto derivado cuando se usa el C_4F_8O para la limpieza de las cámaras.

⁴ Los materiales con baja constante dieléctrica (bajo k) se utilizaron inicialmente como aislantes en los nodos de $0,25\mu m$ o menos, de las estructuras interconectadas en los «chips» o pastillas de semiconductores. Muchos de los materiales de bajo k contienen carbono que puede ser eliminado como CF_4 durante el decapado de las películas delgadas o durante la limpieza de los reactores CVD utilizados para la deposición de bajo k. El CF_4 puede formarse también durante la limpieza de los reactores CVD utilizados para la deposición de carburos.

del producto o del sistema. En el sector electrónico se comercializan más de 20 CF líquidos diferentes, que son a menudo mezclas de compuestos totalmente fluorados.⁵ Dado que los equivalentes CO₂ de cada líquido difieren, debe investigarse y declararse cada uno por separado. El valor preciso de esta conversión está determinado por los requerimientos declarativos específicos que sean aplicables.^{6, 7} Además, los CF líquidos se usan ocasionalmente para limpiar las pantallas TFT-FPD durante la fabricación.

6.2 CUESTIONES METODOLÓGICAS

6.2.1 Elección del método

6.2.1.1 DECAPADO Y LIMPIEZA POR CVD DE SEMICONDUCTORES, PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO Y DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS.

Las emisiones varían según los gases utilizados en la fabricación de los diferentes tipos de dispositivos electrónicos, el proceso empleado (o más groseramente, del tipo de proceso (p. ej., CVD o decapado)), la marca de las herramientas de proceso utilizadas y la implementación de una tecnología de reducción de las emisiones.

La elección de los métodos depende de la disponibilidad de los datos, tal como se bosqueja en el árbol de decisión, véase Figura 6.1, Árbol de decisión para la estimación de las emisiones de los CF generadas por la fabricación de productos electrónicos. Las emisiones provenientes de los CF líquidos se estiman con los métodos de Nivel 1, 2 y 3 que se describen separadamente en esta sección.⁸

El monitoreo continuo de las emisiones (in situ) se considera actualmente un medio técnica y económicamente inviable para estimar las emisiones de esta industria. En todo caso, las emisiones de los CF se miden periódicamente durante el desarrollo de nuevos procesos y herramientas y después de establecidas las condiciones de un proceso listo para la producción comercial (conocidas también como condiciones del proceso nominal).⁹ Antes de lanzar la producción en gran escala, la industria busca establecer los diseños del proceso nominal que minimizarán las emisiones de CF. Sin embargo, nótese que las emisiones de los CF pueden verse afectadas por cambios en las variables del proceso (p. ej., presión, temperatura, potencia de plasma, flujo de gas CF, tiempo de procesamiento). Por lo tanto, la exactitud de los métodos empleados para estimar las emisiones se verá afectada por las diferencias eventuales entre el proceso utilizado para la producción y el proceso nominal de referencia. Además, la eficacia de los equipos de control de las emisiones de los CF depende de que los equipos se operen y mantengan según las especificaciones de los fabricantes: los aumentos en los flujos de gases, la programación de temperaturas inadecuadas y la falta del mantenimiento necesario afectan individual y colectivamente el rendimiento de manera negativa.

La exactitud de las emisiones estimadas depende del método utilizado. El método de Nivel 1 utiliza valores por defecto para todos los parámetros y no toma en cuenta el uso de tecnologías de control de las emisiones. El

⁵ En un estudio relativamente reciente se resumen los usos de los CF líquidos (fluidos de transferencia térmica), su composición química, sus PCA, entre otras características. Véase Burton (2004a).

⁶ Estos materiales se comercializan bajo las marcas comerciales Fluorinert™ y Galden®. Los materiales Fluorinert™ son seleccionados a partir de alcanos, éteres, aminas terciarias y aminoéteres completamente fluorados y de mezclas entre éstos para obtener las propiedades deseadas. Los fluidos Galden® abarcan una gama de poliéteres completamente fluorados llamados perfluoropoliéteres (PFPE) y son también seleccionados debido a las propiedades deseadas.

⁷ Allí donde se utilice una mezcla comercial, los compiladores del inventario deben garantizar que se empleen los factores de emisión apropiados para convertir la masa de mezcla en equivalente CO₂.

⁸ La lógica de las decisiones descrita gráficamente en la Figura 1.6 no indica la posibilidad de combinar los niveles para mejorar las estimaciones de emisiones. Por ejemplo, se pueden alcanzar estimaciones mejoradas de las emisiones usando el Nivel 3 para un gas y proceso específicos y el Nivel 2b para otros gases y procesos, en vez de emplear solamente el método de Nivel 2b. Por igual, los métodos de Nivel 2a y 2b pueden combinarse para obtener estimaciones mejoradas en comparación con las obtenidas usando solo el Nivel 2b. Sin embargo, el método de Nivel 1 no debe combinarse con ningún otro.

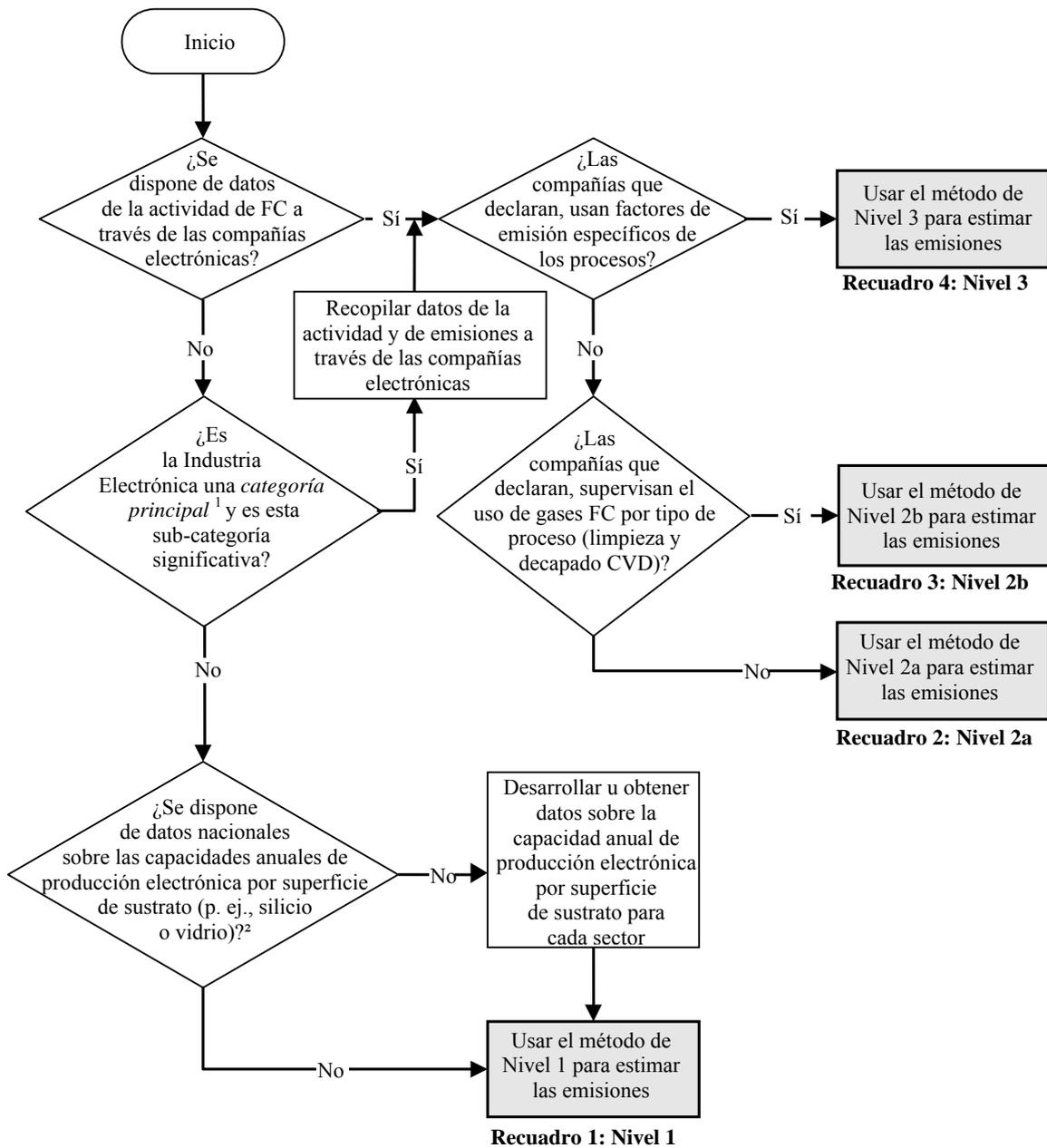
⁹ Las condiciones del proceso nominal se refieren a las condiciones bajo las cuales los fabricantes estandarizan sus equipos para la venta. Son las especificaciones nominales para los flujos gaseosos, la presión de cámara, el tiempo de procesamiento, la potencia de plasma, etc. Es una práctica común que los fabricantes de dispositivos semiconductores modifiquen estas condiciones para optimizar el proceso con el fin de responder a necesidades específicas.

método de Nivel 2a emplea datos específicos de las compañías sobre la proporción de gas utilizada en los procesos, con y sin tecnología de control de las emisiones, pero no distingue entre el decapado y la limpieza y emplea valores por defecto para los demás parámetros. El método de Nivel 2b utiliza datos específicos de las compañías sobre la proporción de gas utilizada en el *decapado*, en comparación con la *limpieza*, y sobre la proporción de gas utilizado en los procesos con tecnología de control de las emisiones, pero se apoya en valores por defecto para todos o algunos de los demás parámetros. El método más riguroso, el de Nivel 3, exige todo un conjunto de datos específicos de los procesos en vez de valores por defecto.

En el Cuadro 6.1 se resumen los datos requeridos para los métodos de estimación de emisiones por nivel, para la fabricación de componentes electrónicos.

CUADRO 6.1					
FUENTES DE INFORMACIÓN NECESARIAS PARA COMPLETAR LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR NIVELES PARA LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS					
	Datos	Nivel 1	Nivel 2a	Nivel 2b	Nivel 3
Gas de proceso entrante en la herramienta	$FC_{i,p}$ = Kg. de gas i suministrado a un proceso específico p o a un conjunto reducido de herramientas comunes de un proceso (p. ej., decapado del nitruro de silicio).				M
	$FC_{i,p}$ = kg. de gas i suministrado a una categoría amplia de procesos (p. ej., decapado o limpieza de cámara por CVD)		M	M(decapado) y M(CVD)	
	h = fracción del gas que permanece en el contenedor de transporte después del uso.		D	D	M
Reacciones del gas de proceso y destrucción en la herramienta	$U_{i,p}$ = tasa de uso (fracción destruida o transformada) para cada gas i y proceso p .		D	D(decapado) y D(CVD) ^a	M
	$B_{CF_4,i,p}$, $B_{C_2F_6,i,p}$, $B_{CHF_3,i,p}$ y $B_{C_3F_8,i,p}$ = factor de emisión para las emisiones de productos derivados CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 y C_3F_8 respectivamente para el gas i para cada proceso.		D	D(decapado) y D(CVD) ^a	M
Control de las emisiones de FC en el proceso posterior	$a_{i,p}$ = fracción del volumen de gas i suministrado a los procesos con tecnologías de control de emisiones de los CF homologadas.		M	M	M
	$d_{i,p}$ = fracción del gas i destruido por la tecnología de control de emisiones.		D	D ^a	M
	$d_{CF_4,p}$, $d_{C_2F_6,p}$, $d_{CHF_3,p}$ y $d_{C_3F_8,p}$ = fracciones respectivas de los productos derivados CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 y C_3F_8 destruidos por la tecnología de control de emisiones. ^b				M
Capacidad de producción anual	C_d = capacidad anual de diseño de la fabricación en términos de área de la superficie de sustrato procesada (p. ej., silicio, vidrio).	M			
	C_u = fracción de la utilización de la capacidad anual	D/M			
<p>M = mídanse o adquieráanse estos valores. D = Utilícense los valores por defecto de la orientación. ^a Cuando estén disponibles y se puedan justificar para los métodos de Nivel 2a y 2b, los valores M pueden sustituirse por valores D Véanse las condiciones del Cuadro 6.6. ^b No existen valores por defecto para los métodos de Nivel 2a y 2b, pues el efecto de los productos derivados ha sido incorporado en los valores-D para $d_{i,p}$ correspondiente el gas i.</p>					

Figura 6.1 **Árbol de decisión para la estimación de las emisiones de los CF generadas por la fabricación de productos electrónicos**



Nota

1. Para un análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión, Véase el Volumen 1 Capítulo 4. Opción metodológica e identificación de categorías principales (considérese la Sección 4.1.2 sobre recursos limitados).

MÉTODO DE NIVEL 1 – POR DEFECTO

El método de estimación de Nivel 1 es el menos exacto y debe emplearse solamente en los casos en los que no se disponga de datos específicos de las compañías. A diferencia de los métodos de Nivel 2 ó 3, el método de Nivel 1 está diseñado para proporcionar estimaciones agregadas de las emisiones de CF, a pesar de que su metodología pareciera estimar emisiones específicas de los gases. Las estimaciones se efectúan simultáneamente para todos los gases enumerados en el Cuadro 6.2 y pueden utilizarse sólo si se han declarado como un conjunto completo. Los cálculos de las estimaciones se apoyan en un conjunto fijo de factores genéricos de emisión. Los elementos del conjunto difieren según el sector (o la clase) de los productos electrónicos fabricados (semiconductores, TFT-FPD o células PV). Cada elemento de un conjunto, que corresponde a un factor de emisión específico del gas, expresa las emisiones promedio por unidad de área de la superficie de sustrato (p. ej., silicio, pantalla TFT-FPD o célula PV) consumido durante la fabricación. Para cada clase de productos electrónicos, los factores (elementos del conjunto) se multiplican por la utilización de la capacidad anual (C_u , una fracción) y la capacidad

anual de diseño de la fabricación (C_d , en unidades de giga metros cuadrados (Gm^2)) de procesamiento de sustrato. El producto ($C_u \cdot C_d$) es una estimación de la cantidad de sustrato consumido durante la fabricación electrónica. El resultado es un conjunto de emisiones anuales expresadas en kg. de gases que abarcan el conjunto para cada clase de productos electrónicos. Debido a que el uso de los CF varía ampliamente durante la producción de PV, para estimar las emisiones de los CF generadas por la fabricación de células PV, se necesita un tercer factor que dé cuenta de la proporción de PV fabricado que emplea CF. La fórmula del Nivel 1 se muestra en la Ecuación 6.1.

ECUACIÓN 6.1
MÉTODO DE NIVEL 1 PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONJUNTO DE EMISIONES DE CF

$$\{FC_i\}_n = \{EF_i \cdot C_u \cdot C_d \cdot [C_{PV} \cdot \delta + (1 - \delta)]\}_n \quad (i = 1, \dots, n)$$

Donde:

$\{FC_i\}_n$ = emisiones de gas CF i , masa del gas i

Nota: $\{ \}_n$ denota el conjunto para cada clase de productos (semiconductores, TFT-FPD o células PV) y n denota el número de gases incluidos en cada conjunto (seis para los semiconductores, tres para la fabricación de TFT-FPD y dos para las células PV. Véase el Cuadro 6.2.) Las estimaciones son válidas sólo si se calculan y declaran para todos los elementos del conjunto usando esta metodología de Nivel 1.

EF_i = factor de emisión del gas CF i expresado como masa anual de emisiones por metro cuadrado de área de la superficie de sustrato para la clase de producto, (masa del gas i)/ m^2

C_u = fracción de la utilización de la capacidad anual de producción de la planta, fracción

C_d = capacidad anual de diseño de fabricación, Gm^2 de sustrato procesado, excepto para la fabricación de PV, que se expresa en Mm^2

C_{PV} = fracción de PV fabricada que emplea CF, fracción

$\delta = 1$ cuando la Ecuación 6.1 se aplica a la industria de PV y cero cuando la Ecuación 6.1 se aplica, ya sea a la industria de los semiconductores o a la de TFT-FPD, adimensional

Este método no da cuenta de las diferencias entre tipos de procesos (decapado versus limpieza), procesos individuales o herramientas. Tampoco da cuenta del empleo posible de dispositivos atmosféricos de control de las emisiones.

Al usar el Nivel 1, los compiladores del inventario no deben modificar de ninguna manera el conjunto de los CF supuestos en el Cuadro 6.2. No deben combinar las emisiones estimadas mediante el método de Nivel 1 con las emisiones estimadas mediante los métodos de Nivel 2 ó 3. Tampoco pueden utilizar, por ejemplo, el factor de Nivel 1 del CF_4 para estimar las emisiones de CF_4 en los semiconductores y combinarlo con los resultados de otros gases CF obtenidos mediante un método de Nivel 2 o 3. (Véase la Sección 6.2.2.1.)

MÉTODO DE NIVEL 2a – PARÁMETROS DE PROCESO ESPECÍFICOS DE LOS GASES

Este método permite calcular las emisiones para cada CF utilizado sobre la base de datos específicos de las compañías sobre el consumo de gas y sobre las tecnologías de control de las emisiones. En él se emplean valores por defecto válidos para toda la industria en relación con el «resto» o fracción del gas comprado que permanece en los contenedores de transporte después del uso (h), la fracción del gas «utilizado» (destruido o transformado) en el proceso de fabricación de semiconductores o TFT-FPD y la fracción de gas convertido en CF_4 o C_2F_6 durante el proceso. Para utilizar el método de Nivel 2a, los compiladores del inventario deben tener una comunicación directa con la industria (p. ej., declaraciones anuales de emisiones) con el fin de reunir los datos y garantizar que las tecnologías de control estén instaladas y en funcionamiento.

Las emisiones totales equivalen a la suma de las emisiones del gas FC_i empleado en el proceso de producción más las emisiones de productos derivados CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 y C_3F_8 que resultan del uso del gas FC_i , como se indica en las ecuaciones 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, y 6.6. A diferencia de los métodos de Nivel 3 y 2b que se explican más adelante en esta sección, el método de Nivel 2a no distingue entre los diferentes procesos o tipos de procesos (decapado versus limpieza), procesos individuales o herramientas. Los factores de emisión por defecto corresponden a promedios ponderados (sobre la base de ponderaciones especificadas por dictamen de expertos), determinados separadamente para cada gas y para *todos* los procesos, *tanto* de decapado *como* de CVD.

Como se discute más abajo, en la sección que trata de los factores de emisión, el método de Nivel 2a utiliza el factor de emisión para el tipo de proceso (CVD o decapado) en el cual el CF individual se utiliza más frecuentemente en un sector electrónico en particular. Este método refleja una tendencia actual en la cual ciertos CF individuales predominan cada vez más en ciertos tipos de procesos (CVD o decapado) a través de cada industria. Sin embargo, en los países donde hay compañías o plantas que se apartan mucho de los patrones de uso más comunes de la industria (p. ej., al usar un gas principalmente en el decapado, mientras que otras industrias lo usan principalmente en el CVD), los compiladores del inventario deben evaluar el potencial de introducción de errores al utilizar el método de Nivel 2a en vez del método de Nivel 2b.

ECUACIÓN 6.2
MÉTODO DE NIVEL 2a PARA ESTIMAR LAS EMISIONES DE CF

$$E_i = (1 - h) \cdot FC_i \cdot (1 - U_i) \cdot (1 - a_i \cdot d_i)$$

Donde:

E_i = emisiones del gas i , kg.

FC_i = consumo de gas i , (p. ej., CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $c-C_4F_8$, $c-C_4F_8O$, C_4F_6 , C_3F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , NF_3 , SF_6), kg.

h = fracción del gas que permanece en el contenedor de transporte (resto) después del uso, fracción

U_i = tasa de uso del gas i (fracción destruida o transformada en el proceso), fracción

a_i = fracción volumétrica del gas i utilizada en procesos con tecnologías de control de emisiones (específico de la compañía o de la planta), fracción

d_i = fracción del gas i destruido por la tecnología de control de emisiones, fracción

ECUACIÓN 6.3
EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO CF_4

$$BPE_{CF_4,i} = (1 - h) \cdot B_{CF_4,i} \cdot FC_i \cdot (1 - a_i \cdot d_{CF_4})$$

Donde:

$BPE_{CF_4,i}$ = emisiones de producto derivado CF_4 generadas por el gas i utilizado, kg.

$B_{CF_4,i}$ = factor de emisión, kg. de CF_4 creado/kg. de gas i utilizado

d_{CF_4} = fracción producto derivado CF_4 destruido por la tecnología de control de emisiones, fracción

ECUACIÓN 6.4
EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO C_2F_6

$$BPE_{C_2F_6,i} = (1 - h) \cdot B_{C_2F_6,i} \cdot FC_i \cdot (1 - a_i \cdot d_{C_2F_6})$$

Donde:

$BPE_{C_2F_6,i}$ = emisiones de producto derivado C_2F_6 generadas por el gas i utilizado, kg.

$B_{C_2F_6,i}$ = factor de emisión, kg. de C_2F_6 creado/kg. de gas i utilizado

$d_{C_2F_6}$ = fracción de producto derivado C_2F_6 destruido por la tecnología de control de emisiones, fracción

ECUACIÓN 6.5
EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO CHF_3

$$BPE_{CHF_3,i} = (1 - h) \cdot B_{CHF_3,i} \cdot FC_i \cdot (1 - a_i \cdot d_{CHF_3})$$

Donde:

$BPE_{CHF_3,i}$ = emisiones de producto derivado CHF_3 generadas por el gas i utilizado, kg.

$B_{CHF_3,i}$ = factor de emisión, kg. de CHF_3 creado/Kg. de gas i utilizado

d_{CHF_3} = fracción producto derivado CHF_3 destruido por la tecnología de control de emisiones, fracción

ECUACIÓN 6.6**EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO C₃F₈**

$$BPE_{C_3F_8,i} = (1-h) \cdot B_{C_3F_8,i} \cdot FC_i \cdot (1-a_i \cdot d_{C_3F_8})$$

Donde:

$BPE_{C_3F_8,i}$ = emisiones de producto derivado C₃F₈ generadas por el gas i utilizado, kg.

$B_{C_3F_8,i}$ = factor de emisión, Kg. de C₃F₈ creado/kg. de gas i utilizado

$d_{C_3F_8}$ = fracción producto derivado C₃F₈ destruido por la tecnología de control de emisiones, fracción

Después de estimar las emisiones del gas i (E_i) y las de los productos derivados CF₄, C₂F₆, CHF₃ y C₃F₈ para cada gas ($BPE_{CF_4,i}$, $BPE_{C_2F_6,i}$, $BPE_{CHF_3,i}$ y $BPE_{C_3F_8,i}$), los compiladores del inventario o las compañías deben sumar estas emisiones para todos los gases y estimar el total agregado de emisiones de CF.

MÉTODO DE NIVEL 2b – PARÁMETROS ESPECÍFICOS DEL TIPO DE PROCESO

El método de Nivel 2b requiere datos sobre las cantidades agregadas de cada gas suministrado en todos los procesos de decapado y en todos los procesos de limpieza ($FC_{i,p}$). Por lo tanto, este método distingue sólo entre tipos amplios de proceso (decapado versus limpieza de cámaras por CVD), pero no distingue entre los muchos procesos individuales posibles ni entre conjuntos pequeños de procesos. Los valores por defecto comunes a toda la industria pueden emplearse para todas o para cualquiera de las cantidades siguientes:

- la fracción del gas que permanece en el contenedor de transporte después del uso denominado «resto» (h);
- la fracción del gas «utilizado» (destruido o transformado) por tipo de proceso ($U_{i,p}$);
- el factor de emisión para las emisiones de producto derivado CF₄ en el tipo de proceso ($B_{CF_4,i,p}$);
- el factor de emisión para las emisiones de producto derivado C₂F₆ en el tipo de proceso ($B_{C_2F_6,i,p}$);
- el factor de emisión para las emisiones de producto derivado CHF₃ en el tipo de proceso ($B_{CHF_3,i,p}$);
- y el factor de emisión para las emisiones de producto derivado C₃F₈ en el tipo de proceso ($B_{C_3F_8,i,p}$).

Se presentan también (véase Cuadro 6.6) valores por defecto para la fracción del gas destruido por la tecnología de control de emisiones por tipo de proceso ($d_{i,p}$, $d_{CF_4,p}$, $d_{C_2F_6,p}$, $d_{CHF_3,p}$ y $d_{C_3F_8,p}$). El valor por defecto para $a_{i,p}$ es cero, la fracción volumétrica de gas suministrado al proceso con tecnología de control de emisiones, a menos que estas tecnologías estén instaladas. Los valores por defecto para $U_{i,p}$, $B_{CF_4,i,p}$, $B_{C_2F_6,i,p}$, $B_{CHF_3,i,p}$ y $B_{C_3F_8,i,p}$ representan promedios simples no ponderados, determinados separadamente para cada gas, sobre *todos* los procesos de decapado y sobre *todos* los procesos CVD. Los factores de emisión específicos de la compañía o de la planta pueden sustituirse por los valores por defecto cuando estén disponibles. Las ecuaciones dan cuenta del uso de dispositivos de control de emisiones específicos de las plantas, pero no toman en cuenta las diferencias entre procesos o herramientas individuales ni entre las plantas de fabricación respecto de las diferentes combinaciones de procesos y herramientas. Por lo tanto, las estimaciones hechas con el método de Nivel 2b serán menos exactas que las obtenidas con el de Nivel 3. Asimismo, nótese que el método de Nivel 2b es aplicable a la fabricación de semiconductores y de TFT-FPD.

Las emisiones que resultan del uso de un CF específico (FC_i) consisten en emisiones del FC_i en sí mismo, *más* las emisiones de los compuestos CF₄, C₂F₆, CHF₃ y C₃F₈ creados como productos derivados durante el uso de FC_i . Para cada gas y para cada tipo de proceso, debe repetirse el siguiente cálculo:

ECUACIÓN 6.7**MÉTODO DE NIVEL 2b PARA ESTIMAR LAS EMISIONES DE CF**

$$E_i = (1-h) \cdot \sum_p \left[FC_{i,p} \cdot (1-U_{i,p}) \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{i,p}) \right]$$

Donde:

E_i = emisiones del gas i , kg.

p = tipo de proceso (decapado versus limpieza de cámaras por CVD)

$FC_{i,p}$ = masa del gas i suministrado al proceso p (p. ej., CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , $c-C_4F_8$, $c-C_4F_8O$, C_4F_6 , C_5F_8 , CHF_3 , CH_2F_2 , NF_3 , SF_6), kg.

h = fracción del gas que permanece en el contenedor de transporte (resto) después del uso, fracción

$U_{i,p}$ = tasa de uso para cada gas i y tipo de proceso p (fracción destruida o transformada en el proceso), fracción

$a_{i,p}$ = fracción volumétrica del gas i suministrado al proceso p con tecnologías de control de emisiones (específico de la compañía o de la planta), fracción

$d_{i,p}$ = fracción del gas i destruido por la tecnología de control de emisiones empleada en el proceso p (si se emplea más de una tecnología de control de emisiones en el proceso p , este valor será el promedio ponderado de la fracción destruida por esas tecnologías de control de emisiones, donde cada fracción es ponderada por la cantidad de gas suministrado a las herramientas que emplean esa tecnología), fracción

ECUACIÓN 6.8
EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO CF_4

$$BPE_{CF_4,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{CF_4,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{CF_4,p}) \right]$$

Donde:

$BPE_{CF_4,i}$ = emisiones de producto derivado CF_4 convertido a partir del gas i utilizado, kg.

$B_{CF_4,i,p}$ = factor de emisión para las emisiones del producto derivado CF_4 convertido a partir del gas i en el tipo de proceso p , kg. de CF_4 creado/kg. de gas i utilizado

$d_{CF_4,p}$ = fracción de producto derivado CF_4 destruido por la tecnología de control de emisiones empleada en el tipo de proceso p (p. ej., una de las tecnologías de control enumeradas en el Cuadro 6.6), fracción

ECUACIÓN 6.9
EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO C_2F_6

$$BPE_{C_2F_6,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{C_2F_6,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{C_2F_6,p}) \right]$$

Donde:

$BPE_{C_2F_6,i}$ = emisiones de producto derivado C_2F_6 convertido a partir del gas i utilizado, kg.

$B_{C_2F_6,i,p}$ = factor de emisión para el producto derivado C_2F_6 convertido a partir del gas i en el tipo de proceso p , kg. de C_2F_6 creado/kg. de gas i utilizado

$d_{C_2F_6,p}$ = fracción de producto derivado C_2F_6 destruido por la tecnología de control de emisiones empleada en el tipo de proceso p (p. ej., una de las tecnologías de control enumeradas en el Cuadro 6.6), fracción

ECUACIÓN 6.10
EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO CHF_3

$$BPE_{CHF_3,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{CHF_3,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1-a_{i,p} \cdot d_{CHF_3,p}) \right]$$

Donde:

$BPE_{CHF_3,i}$ = emisiones de producto derivado CHF_3 convertido a partir del gas i utilizado, kg.

$B_{CHF_3,i,p}$ = factor de emisión para el producto derivado CHF_3 convertido a partir del gas i en el tipo de proceso p , kg. de CHF_3 creado/kg. de gas i utilizado

$d_{\text{CHF}_3,p}$ = fracción de producto derivado CHF_3 destruido por la tecnología de control de emisiones empleada en el tipo de proceso p (p. ej., una de las tecnologías de control enumeradas en el Cuadro 6.6), fracción

ECUACIÓN 6.11
EMISIONES DE PRODUCTO DERIVADO C_3F_8

$$BPE_{\text{C}_3\text{F}_8,i} = (1-h) \cdot \sum_p \left[B_{\text{C}_3\text{F}_8,i,p} \cdot FC_{i,p} \cdot (1 - a_{i,p} \cdot d_{\text{C}_3\text{F}_8,p}) \right]$$

Donde:

$BPE_{\text{C}_3\text{F}_8,i}$ = emisiones de producto derivado C_3F_8 generadas por el gas i utilizado, kg.

$B_{\text{C}_3\text{F}_8,i,p}$ = factor de emisión para las emisiones del producto derivado C_3F_8 convertido a partir del gas i en el tipo de proceso p , kg. de C_3F_8 creado/kg. de gas i utilizado

$d_{\text{C}_3\text{F}_8,p}$ = fracción de producto derivado C_3F_8 destruido por la tecnología de control de emisiones empleada en el tipo de proceso p (p. ej., una de las tecnologías de control enumeradas en el Cuadro 6.6), fracción

Nótese que en algunos procedimientos de decapado o de limpieza pueden utilizarse múltiples precursores de los CF de manera simultánea y que las emisiones de CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 o C_3F_8 como productos derivados pueden originarse a partir de la descomposición de cada precursor individual de CF. En tales casos, las emisiones de los productos derivados CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 o C_3F_8 deben declararse como procedentes del gas CF que presente el flujo de masa más elevado.

MÉTODO DE NIVEL 3 – PARÁMETROS ESPECÍFICOS DEL PROCESO

El método de Nivel 3 utiliza también las Ecuaciones 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11. Sin embargo, este método requiere de valores específicos de las compañías o específicos de las plantas para todos los parámetros utilizados en estas ecuaciones, para cada proceso individual o para cada pequeño conjunto de procesos (p. ej., decapado del nitruro de silicio o limpieza de las cámaras de las herramientas de depósito químico por fase vapor estimulado por plasma (PECVD, del inglés, *plasma enhanced chemical vapour deposition*). Por lo tanto, al usar las Ecuaciones 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11, los compiladores del inventario habrán de interpretar el índice «p» de estas ecuaciones, como un «Proceso» específico (p. ej., decapado del nitruro de silicio o limpieza de las cámaras de las herramientas de PECVD) y no como un «Tipo de proceso».

Para los efectos de la transparencia y la comparación, deberán documentar bien los valores utilizados para estos parámetros de emisiones (véase la Sección 6.2.2).

Formación de CF_4 a partir de películas que contienen C, durante la fabricación de semiconductores

Los métodos de Nivel 2a, Nivel 2b y Nivel 3 dan cuenta de las emisiones del CF_4 que se forma durante la eliminación por decapado de los materiales de baja constante dieléctrica (k) que contienen carbono o de la limpieza de reactores CVD que contienen películas de bajo-k o carburo, durante la fabricación de semiconductores. El CF_4 puede formarse aun si el precursor de los CF no contiene carbono o si no es un gas de efecto invernadero.

Por ejemplo, la limpieza de los reactores de CVD de bajo-k con NF_3 genera CF_4 como producto derivado. En estos casos, debe emplearse la Ecuación 6.7 para declarar las emisiones de NF_3 y debe usarse el resultado de la Ecuación 6.8 para reflejar las emisiones de CF_4 del proceso. Allí, también se puede formar CF_4 cuando se emplea F_2 , COF_2 , o ClF_3 para la limpieza de las cámaras. En este caso, las emisiones de CF_4 se estiman mediante la Ecuación 6.8 y el resultado se suma al total de las emisiones de CF_4 obtenido mediante la Ecuación 6.7. En ambos casos, debe medirse $B_{\text{CF}_4,i,p}$ como la fracción de la masa de CF_4 producido, respecto de la masa del gas limpio o de gas de decapado que se introduce en el reactor.

Luego de estimar las emisiones para cada gas CF y las emisiones de los productos derivados CF_4 , C_2F_6 , CHF_3 y C_3F_8 , los compiladores del inventario o las compañías deben sumar estas emisiones sobre todos los gases para lograr una estimación de la agregación de emisiones de los CF a partir de un proceso en particular

RECUADRO 6.1
EJEMPLO PARA LA FABRICACIÓN DE SEMICONDUCTORES

Por ejemplo, si una fuente utiliza NF_3 (para la limpieza de cámaras y para el decapado), CHF_3 (decapado) y CF_4 (decapado), si se han usado películas de bajo-k, el total de las emisiones se estima mediante la Ecuación 6.7 para el NF_3 , el CHF_3 y el CF_4 y la Ecuación 6.8 para la formación de CF_4 , cuando las películas de bajo-k se eliminan con NF_3 . En forma de ecuación, el total es:

$$\text{Total de las emisiones de los CF} = E_{\text{NF}_3} + E_{\text{CHF}_3} + E_{\text{CF}_4} + \text{BPE}_{\text{CF}_4, \text{NF}_3}$$

6.2.1.2 FLUIDOS DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

Existen dos métodos para estimar las emisiones derivadas del uso de los fluidos de transferencia térmica. La elección de los métodos depende de la disponibilidad de los datos de la actividad respecto del uso de los fluidos de transferencia térmica lo cual se plantea en el árbol de decisión (véase la Figura 6.2, Árbol de decisión para la estimación de las emisiones de los CF generadas por los fluidos de transferencia térmica, y véase la Sección 1.5 del Capítulo 1, Opción entre el método del equilibrio de masas y el de los factores de emisión).

MÉTODO DE NIVEL 1 – FLUIDOS DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

El Nivel 1 es apropiado cuando no se dispone de datos específicos de las compañías sobre los fluidos de transferencia térmica. Es el menos exacto de los dos métodos para estimar las emisiones derivadas de las pérdidas de fluidos de transferencia térmica. A diferencia del método de Nivel 2, este método proporciona una estimación de emisiones agregadas —una emisión promedio ponderada sobre todos los CF líquidos, que se expresa como la masa de C_6F_{14} ¹⁰. El cálculo se basa en un factor de emisión genérico que expresa el promedio de las emisiones agregadas por unidad de silicio consumido durante la fabricación de semiconductores. La fórmula se muestra en la Ecuación 6.12.

ECUACIÓN 6.12
MÉTODO DE NIVEL 1 PARA ESTIMAR EL TOTAL DE EMISIONES DE LOS CF GENERADAS POR LOS FLUIDOS DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

$$FC_{\text{líquido, total}} = EF_l \cdot C_u \cdot C_d$$

Donde:

$FC_{\text{líquido, total}}$ = total de emisiones de los CF expresadas en términos de la masa de C_6F_{14} , Mt de C_6F_{14}

EF_l = factor de emisión (emisiones agregadas de los CF por Gm^2 de silicio consumido durante el periodo expresado en términos de la masa de C_6F_{14} (Véase el Cuadro 6.2.)), Mt de $\text{C}_6\text{F}_{14}/\text{Gm}^2$

C_u = promedio de la utilización de la capacidad para todas las instalaciones de fabricación de semiconductores del país durante el periodo, fracción

C_d = capacidad de diseño de las instalaciones de fabricación de semiconductores del país, Gm^2

MÉTODO DE NIVEL 2 – FLUIDOS DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

Existe un solo método de Nivel 2 para estimar las emisiones efectivas derivadas del uso de cada fluido CF. Se trata de un método de equilibrio de masas que da cuenta de la utilización de los CF líquidos durante un periodo anual. Es el apropiado cuando se dispone de datos específicos de las compañías. Los CF líquidos se emplean a lo largo del año para llenar los equipos recientemente adquiridos y para reemplazar las pérdidas por evaporación de fluido de los equipos en funcionamiento. El método de Nivel 2 desestima las pérdidas de fluido que se producen durante el llenado de equipos nuevos o existentes, o cuando se realiza el desmantelamiento de equipos viejos (lo cual es razonable para estos fluidos caros).¹¹ Los compiladores del inventario deben obtener de las compañías la

¹⁰ En ausencia de estimaciones del PCA, se ha utilizado como sustituto el PCA del C_6F_{14} (para derivar el factor de emisión por defecto). (Véase el inventario *Inventory of U.S. Greenhouse Gas and Sinks: 1990-2003*, la nota al pie de página del Cuadro 4-58, Página 166. (U.S. EPA, 2005))

¹¹ Los precios de los fluidos de transferencia térmica varían entre 55 y 130 USD/litro. 3M, conocido fabricante de fluidos de transferencia térmica, estima que una planta de fabricación de la generación del año 2000, puede perder 1 900 litros/año a través de la evaporación. Los fabricantes de equipos de ensayo que usan fluidos de transferencia térmica declaran índices

composición química de los fluidos cuyas emisiones se estén estimando. El método se expresa en la Ecuación 6.13.

ECUACIÓN 6.13
MÉTODO DE NIVEL 2 PARA ESTIMAR LAS EMISIONES DE LOS CF GENERADAS POR LOS FLUIDOS DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

$$FC_i = \rho_i \cdot [I_{i,t-1}(l) + P_{i,t}(l) - N_{i,t}(l) + R_{i,t}(l) - I_{i,t}(l) - D_{i,t}(l)]$$

Donde:

FC_i = emisiones de FC_i , kg.

ρ_i = densidad del líquido FC_i , kg./litro

$I_{i,t-1}(l)$ = existencia en inventario del líquido FC_i al término del periodo anterior, litros

$P_{i,t}(l)$ = compras netas del líquido FC_i durante el periodo (neto de compras y de toda devolución), litros

$N_{i,t}(l)$ = carga total (o capacidad nominal) de las instalaciones nuevas de equipos, litros

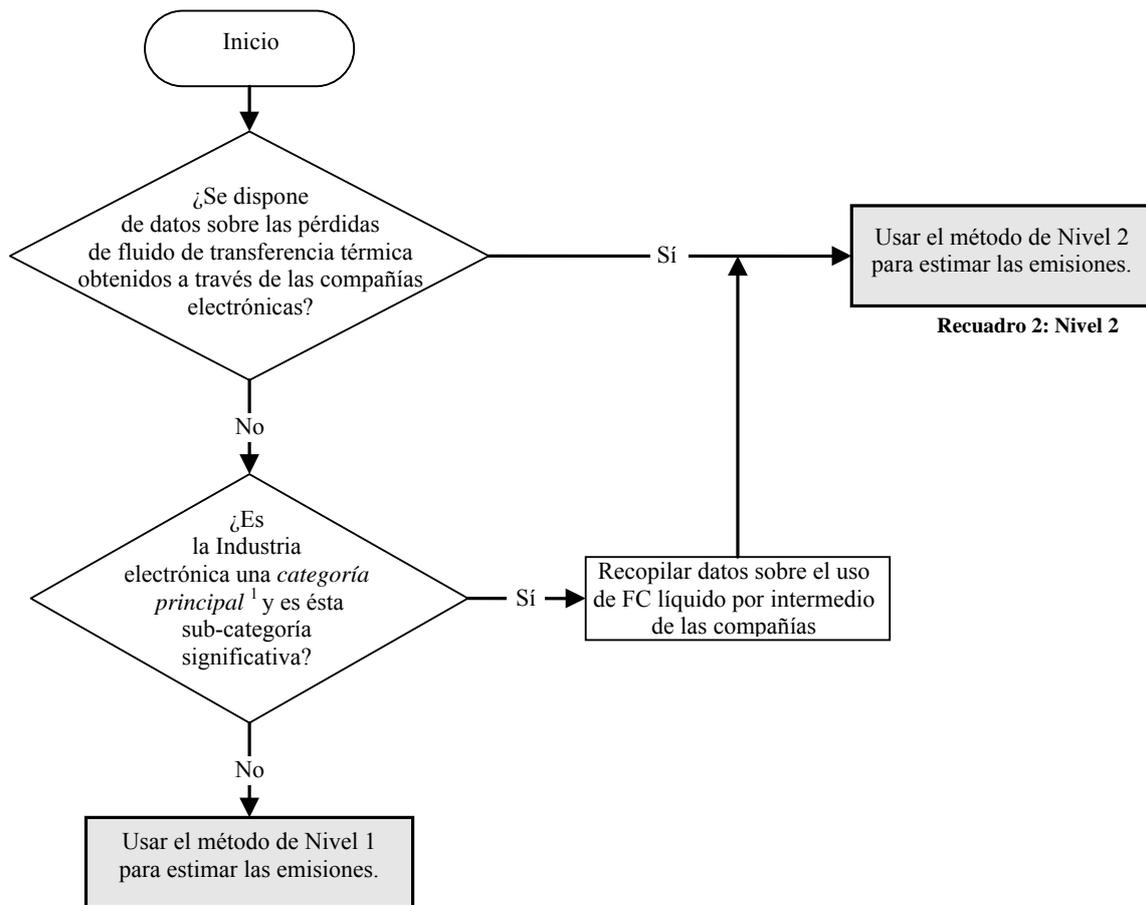
$N_{i,t}(l)$ = carga total (o capacidad nominal) de los equipos retirados o vendidos, litros

$I_{i,t}(l)$ = existencia en inventario del líquido FC_i al término del periodo, litros

$D_{i,t}(l)$ = cantidad de FC_i recuperada y enviada fuera del sitio, proveniente de los equipos retirados durante el periodo, litros

de pérdida de aproximadamente 30 litros/año/sistema para los diseños más nuevos que reducen las pérdidas por evaporación y de 50 litros/año/sistema para los diseños más viejos.

Figura 6.2 **Árbol de decisión para la estimación de las emisiones de los CF generadas por las pérdidas de fluidos de transferencia térmica en la fabricación de productos electrónicos.**



Nota

Recuadro 1: Nivel 1

1. Para un análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión, Véase el Volumen 1 Capítulo 4. Opción metodológica e identificación de categorías principales (considérese la Sección 4.1.2 sobre recursos limitados).

6.2.2 Elección de los factores de emisión¹²

6.2.2.1 DECAPADO Y LIMPIEZA POR CVD DE SEMICONDUCTORES, PANTALLAS DE CRISTAL LÍQUIDO Y DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS.

NIVEL 1

Los factores de emisión por defecto para el método de Nivel 1 se presentan más abajo, en el Cuadro 6.2.

Al usar el Nivel 1, no es una buena práctica modificar, de ninguna manera, el conjunto de los CF ni los valores de los factores de emisión supuestos en el Cuadro 6.2. Los compiladores del inventario no deben combinar las emisiones estimadas mediante el método de Nivel 1 con las emisiones estimadas mediante los métodos de Nivel 2 ó 3. Por ejemplo, los compiladores no deben utilizar el factor de Nivel 1 del CF₄ para estimar las emisiones de CF₄ en los semiconductores y combinarlo con los resultados para otros gases CF obtenidos mediante un método de Nivel 2 o 3. Nótese también, que los factores de emisión de los CF de Nivel 1 presentados en el Cuadro 6.2 no deben utilizarse para ningún otro propósito que el de estimar las emisiones de los CF agregadas anuales provenientes de la fabricación de semiconductores, de TFT-FPD y de PV, y destinadas a la compilación del inventario nacional de gases de efecto invernadero.

¹² Las fuentes y los métodos para desarrollar los factores de emisión, si no se proporcionan explícitamente en el Capítulo 6, pueden consultarse en Burton (2006).

CUADRO 6.2 FACTORES DE EMISIÓN DE NIVEL 1 ESPECÍFICOS DE LOS GASES PARA LAS EMISIONES DE CF GENERADAS POR LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS ELECTRÓNICOS.							
Sector de la industria electrónica	Factor de emisión (EF) (masa por unidad de área del sustrato procesado)						
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	C ₃ F ₈	NF ₃	SF ₆	C ₆ F ₁₄
Semiconductores, kg./m ²	0,9	1,0	0,04	0,05	0,04	0,2	NA
TFT-FPD, g/m ²	0,5	NA	NA	NA	0,9	4,0	NA
células PV ^a , g/m ²	5	0,2	NA	NA	NA	NA	NA
Fluidos de transferencia térmica ^b , Kg./m ²	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,3

^a EF adaptados de un trabajo no publicado de Fthenakis, Alsema y Agostinelli. (Fthenakis ,2005) Nótese que el factor es aplicable sólo a las tecnologías específicas del silicio y que se aplica a la reducción de las emisiones.

^b EF supone que los fluidos de transferencia térmica tienen el mismo PCA y que el C₆F₁₄ representa un sustituto adecuado. El origen de este factor se describe en Burton, 2004, y se basa parcialmente en el trabajo de Tuma y Tousignant (2001).

NIVEL 2

Como se analizó más arriba, los factores de emisión basados en variables simples de la producción electrónica no son adecuados para dar cuenta de todos los factores que influyen en las emisiones. Para preparar una estimación fiable se necesitan datos sobre los siguientes parámetros:

- Los gases utilizados;
- El tipo de proceso utilizado (CVD o decapado);
- La marca de la herramienta de proceso utilizada;
- La tecnología de reducción de las emisiones.

Los valores por defecto se han desarrollado para los parámetros utilizados en los métodos de Nivel 2a y 2b (véase la Figura 6.1) sobre la base de mediciones directas, de la bibliografía y del dictamen de expertos (véanse los Cuadros 6.3, 6.4 y 6.5, Factores de emisión por defecto de Nivel 2 para las emisiones de los CF generadas por la fabricación de semiconductores¹², de TFT-FPD¹³ y PV¹², respectivamente. Dada la dificultad de representar las diversas condiciones de producción dentro de la industria electrónica, los parámetros de emisión por defecto son inherentemente inciertos. Si bien la exactitud puede mejorarse mediante conjuntos más grandes de datos de mediciones y donde los factores se aplican a procesos similares utilizando procedimientos químicos similares o idénticos, el desarrollo de los factores por defecto implica necesariamente alguna forma de promedio de todos los datos.

Los especialistas de la industria electrónica esperan que el aporte de las innovaciones técnicas rápidas por parte de los proveedores de productos químicos y de equipos, así como de los fabricantes de productos electrónicos resulte en una reducción mayor de las emisiones en el futuro (vale decir, a partir de 2006). Como consecuencia, los factores de emisión para estas categorías deben evolucionar para reflejar estos cambios. Las industrias de semiconductores y de TFT-FPD han establecido mecanismos, a través del *World Semiconductor Council* (Consejo mundial de semiconductores) y del *World LCD Industry Cooperation Committee* (Comité mundial de cooperación de la industria de LCD), respectivamente, para evaluar los factores mundiales de emisión. La industria de PV parece estar considerando el establecimiento de un mecanismo para trazar las emisiones de PFC durante la producción de PV. (Fthenakis, 2006).

El uso de los CF durante la fabricación de PV puede aumentar o no. Las pruebas existentes sugieren que, si aumentara el uso de los CF en esta industria, se harán esfuerzos para controlar sus emisiones (Agostinelli *et al.*, 2004; Rentsch *et al.*, 2005). Los compiladores del inventario pueden consultar periódicamente a la industria para comprender mejor las circunstancias nacionales y mundiales.

Los Cuadros 6.3 y 6.4 incluyen dos entradas para el NF₃: NF₃ Remoto y NF₃. El primero se refiere a un método de limpieza en el cual los agentes de limpieza de las películas formadas de NF₃ (átomos de F) se producen en un flujo de plasma que precede (remoto) a la cámara que se somete a limpieza. El último, llamado simplemente

¹³ Los factores de emisión (EF) para la fabricación de TFT-FPD corresponden a promedios simples (no ponderados) desarrollados a partir de valores específicos de los gases y de los procesos publicados por Nishida *et al.* (2005).

NF₃, se refiere a un proceso de limpieza del NF₃ in situ, análogo al proceso de limpieza para otros gases como el C₂F₆ y el C₃F₈.

El valor por defecto para la fracción de gas que permanece en el contenedor de transporte (el resto) es de 0,10.

CUADRO 6.3														
FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO DE NIVEL 2 PARA LAS EMISIONES DE CF GENERADAS POR LA FABRICACIÓN DE SEMICONDUCTORES.														
Gas de proceso (i)	Gases de efecto invernadero con PCA del TIE									Gases de efecto invernadero sin PCA del TIE			Productos derivados CF que no producen GEI	
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ Remoto	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Nivel 2a														
1-Ui	0,9	0,6	0,4	0,1	0,4	0,1	0,02	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	NA	NA
B _{CF4}	NA	0,2	0,07	0,08	0,1	0,1	0,02 [‡]	0,09	NA	0,3	0,1	0,1	0,02 [‡]	0,02 [‡]
B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0,1	NA	NA	NA	0,2	0,04	NA	NA	NA
B _{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,04	NA	NA
Nivel 2b														
Decapado 1-Ui	0,7*	0,4*	0,4*	0,06*	NA	0,2*	NA	0,2	0,2	0,1	0,2	NA	NA	NA
CVD 1-Ui	0,9	0,6	NA	NA	0,4	0,1	0,02	0,2	NA	NA	0,1	0,1	NA	NA
Decapado B _{CF4}	NA	0,4*	0,07*	0,08*	NA	0,2	NA	NA	NA	0,3*	0,2	NA	NA	NA
Decapado B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0,2	NA	NA	NA	0,2*	0,2	NA	NA	NA
CVD B _{CF4}	NA	0,1	NA	NA	0,1	0,1	0,02 [‡]	0,1 [†]	NA	NA	0,1	0,1	0,02 [‡]	0,02 [‡]
CVD B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B _{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,04	NA	NA
Notas: NA significa que, según la información disponible actualmente, no se aplica al caso.														
‡ Los factores de emisión por defecto para el F ₂ y el COF ₂ pueden aplicarse a la limpieza de reactores CVD de bajo-k con CIF ₃ .														
* La estimación incluye los procesos de decapado con gases múltiples														
† La estimación refleja la presencia de procesos de decapado de bajo-k, carburo y gases múltiples que pueden contener un aditivo de CF que contiene C.														

CUADRO 6.4														
FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO DE NIVEL 2 PARA LAS EMISIONES DE CF GENERADAS POR LA FABRICACIÓN DE LCD.														
Gas de proceso (i)	Gases de efecto invernadero con PCA del TIE									Gases de efecto invernadero sin PCA del TIE			Productos derivados CF que no producen GEI	
	CF₄	C₂F₆	CHF₃	CH₂F₂	C₃F₈	c-C₄F₈	NF₃ Remoto	NF₃	SF₆	C₄F₆	C₅F₈	C₄F₈O	F₂	COF₂
Nivel 2a														
1-Ui	0,6	NA	0,2	NA	NA	0,1	0,03	0,3	0,6	NA	NA	NA	NA	NA
B_{CF4}	NA	NA	0,07	NA	NA	0,009	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	0,02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{C2F6}	NA	NA	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Nivel 2b														
Decapado 1-Ui	0,6	NA	0,2	NA	NA	0,1	NA	NA	0,3	NA	NA	NA	NA	NA
CVD 1-Ui	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,03	0,3	0,9	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B_{CF4}	NA	NA	0,07	NA	NA	0,009	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B_{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	0,02	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B_{C2F6}	NA	NA	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{CF4}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Notas: NA significa que, según la información disponible actualmente, no se aplica al caso.														

CUADRO 6.5														
FACTORES DE EMISIÓN POR DEFECTO DE NIVEL 2 PARA LAS EMISIONES DE CF GENERADAS POR LA FABRICACIÓN DE PV.														
Gas de proceso (i)	Gases de efecto invernadero con PCA del TIE									Gases de efecto invernadero sin PCA del TIE			Productos derivados CF que no producen GEI	
	CF₄	C₂F₆	CHF₃	CH₂F₂	C₃F₈	c-C₄F₈	NF₃ Remoto	NF₃	SF₆	C₄F₆	C₅F₈	C₄F₈O	F₂	COF₂
Nivel 2a														
1-Ui	0,7	0,6	0,4	NA	0,4	0,2	NA	0,2	0,4	NA	NA	NA	NA	NA
B_{CF4}	NA	0,2	NA	NA	0,2	0,1	NA	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0,1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Nivel 2b														
Decapado 1-Ui	0,7	0,4	0,4	NA	NA	0,2	NA	NA	0,4	NA	NA	NA	NA	NA
CVD 1-Ui	NA	0,6	NA	NA	0,1	0,1	NA	0,3	0,4	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B_{CF4}	NA	0,2	NA	NA	NA	0,1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	0,1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{CF4}	NA	0,2	NA	NA	0,2	0,1	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Notas: NA significa que, según la información disponible actualmente, no se aplica al caso.														

CUADRO 6.6 PARÁMETROS DE EFICIENCIA POR DEFECTO DE NIVEL 2a Y 2b PARA LAS TECNOLOGÍAS DE REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE LOS CF EN LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA							
Tecnología de control de las emisiones	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ ^f	SF ₆
Destrucción^c	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,95	0,9
Captura/recuperación^d	0,75	0,9	0,9	NE	NE	NE	0,9

^a Los valores corresponden a promedios simples (no ponderados) de las eficiencias de destrucción para todas las tecnologías de reducción. Estos factores de emisión no se aplican a las tecnologías de control de emisiones que no pueden reducir el CF₄ con una eficiencia de destrucción o de eliminación (DRE) ≥ 85 por ciento, cuando el CF₄ está presente como gas de entrada o como producto derivado y cuando todos los otros gases CF tienen un DRE ≥ 90 por ciento. Si los fabricantes emplean cualquier otro tipo de tecnología de control de las emisiones, su eficiencia de destrucción es de 0 por ciento cuando se utilizan los métodos de Nivel 2.

^b Los factores de las tecnologías de control de las emisiones de Nivel 2 son aplicables sólo a los dispositivos catalíticos, por plasma, calentados eléctricamente y los que queman combustibles y que

- estén diseñados específicamente para reducir los CF; que
- se utilicen dentro de los límites del proceso especificados por el fabricante y de conformidad con las programaciones especificadas de mantenimiento; y que
- hayan sido sometidos a mediciones y hayan sido confirmados bajo las condiciones efectivas del proceso, utilizando un protocolo válido que dé cuenta de los errores conocidos de medición, incluidos, por ejemplo, la formación de producto derivado CF₄ durante el C₂F₆, así como el efecto de la dilución, el uso de oxígeno, o ambos, en los sistemas de reducción por combustión.

^c Valores promedio para las tecnologías de reducción por quema de combustible, por plasma y catalíticas

^d Valores promedio para las tecnologías de captura y de recuperación criogénicas y por membrana.

^e Datos del proveedor verificados por los fabricantes de semiconductores. Los factores deben utilizarse sólo cuando una tecnología de control de las emisiones se está utilizando y manteniendo de conformidad con las especificaciones de reducción del fabricante.

El empleo del NF₃ en el proceso de decapado es típicamente pequeño comparado con el empleo en el CVD. Generalmente, con el método de Nivel 2b, las emisiones agregadas de NF₃ provenientes del decapado y del CVD no serán mayores que las estimaciones realizadas con los métodos de Nivel 2a o de Nivel 1.

NE = no ensayado.

Factores de emisión de las herramientas de proceso

Los procedimientos para calcular los factores de emisión de las herramientas de proceso son idénticos para los métodos de Nivel 2a y de Nivel 2b. Los factores de emisión de las herramientas de proceso se definen como la cantidad de gas de efecto invernadero emitido, dividida por la cantidad de gas de efecto invernadero usado en el proceso. Los factores de emisión corresponden al término «(1 - U_i)» de las fórmulas de Nivel 2. Por ejemplo, el factor de emisión de 0,9 para el CF₄ (véase el Cuadro 6.3, más arriba, valor del Nivel 2a) significa que el 90 por ciento del CF₄ utilizado en el proceso se emite como CF₄.

También se han calculado los factores de emisión de los productos derivados. El producto derivado más significativo es el CF₄. Si bien se sostiene, en general, que los únicos gases que emiten cantidades significativas de CF₄ como producto derivado son el C₂F₆ y el C₃F₈, los datos proporcionados por los fabricantes de herramientas y por los proveedores de productos químicos indican que el CF₄ se forma también a partir de las mezclas de gases (p. ej., los que contienen CHF₃ o CH₂F₂) y a partir del c-C₄F₈. Como resultado de este análisis, se han calculado los factores de emisión del producto derivado CF₄ para los gases CHF₃, CH₂F₂, C₂F₆, C₃F₈, c-C₄F₈ y C₄F₈O. Por ejemplo, un valor de 0,1 para el C₃F₈ (tomado del Cuadro 6.3, más arriba, valor del Nivel 2a) significa que el 10 por ciento del C₃F₈ utilizado se convierte en CF₄. Sin embargo, el C₂F₆ puede ser emitido también a partir de la descomposición de moléculas como el C₄F₆. Como se ha descrito anteriormente, el CF₄ puede formarse también al decapar o limpiar cámaras donde hay presencia de películas que contienen carbono.

Para calcular los factores de emisión de Nivel 2b de las herramientas de proceso, se han recopilado datos de los equipos de proceso y de los fabricantes de gases. Se los recopiló según el tipo de proceso (ya sea la deposición química en fase vapor (CVD) o el decapado) y también por tipo de gas (p. ej., C₂F₆, CF₄). Los métodos utilizados para conducir los ensayos de las emisiones fueron el de la Espectrometría de masas cuadrupolar (QMS, del inglés, *Quadrupole Mass Spectrometry*) y el de la Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, del inglés, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), los mejores métodos conocidos para medir las emisiones de las herramientas de proceso. Para cuantificar los resultados, se utilizaron las normas de calibración (generalmente mezclas al 1 por ciento con equilibrio de N₂). El protocolo de medición y los requisitos de control de calidad respetados están delineados en las directrices indicadas en «*Guidelines for Environmental Characterisation of Semiconductor Equipment*». (Meyers *et al.*, 2001)¹⁴. Los factores de emisión para el Nivel

¹⁴ Estas directrices han sido adoptadas también por los fabricantes de pantallas planas para medir las emisiones de CF durante la fabricación de dispositivos de pantalla plana.

2b (véanse, más arriba, los Cuadros 6.3 y 6.4) corresponden al promedio simple (no ponderado) de los datos recopilados para cada gas para el decapado y para el CVD, redondeados a una cifra significativa.^{12, 16}

Para determinar los factores de emisión de Nivel 2a de las herramientas de proceso, se requiere conocer las cantidades de gas utilizado en un proceso típico de fabricación de semiconductores. Se obtuvieron los factores de emisión de Nivel 2a utilizando las ponderaciones facilitadas por los expertos de la industria, en términos de la proporción de cada gas utilizado en los procesos de decapado y de limpieza. Por ejemplo, los factores de emisión de Nivel 2b para el C_2F_6 (Cuadro 6.3) son de 0,5 (decapado) y de 0,6 (CVD). La distribución del uso del C_2F_6 entre los procesos de decapado y de limpieza de cámaras por CVD durante la fabricación de semiconductores es de 20:80. Al aplicar esta ponderación a los factores de emisión se obtiene un valor de 0,6 para el factor del C_2F_6 de Nivel 2b, aproximado a una cifra significativa. La distribución correspondiente al uso del SF_6 en la fabricación de TFT-FPD es de 50:50, lo cual da un valor de 0,6 para el correspondiente factor de emisión de Nivel 2a (Cuadro 6.4).¹⁵

Para los factores de emisión de Nivel 3, los fabricantes de semiconductores emplean valores específicos de las compañías o de las plantas, en vez de utilizar los valores por defecto como los enumerados más arriba, en el Cuadro 6.1. Para garantizar la calidad de los factores de emisión, deben efectuarse ensayos de emisiones conformes a los métodos acreditados¹⁶. Si un tercer proveedor realiza los ensayos de las emisiones, el fabricante de semiconductores debe asegurarse de que ese tercer proveedor pueda cumplir con todos los requisitos delineados en la Revisión 3.0 de las Directrices para la caracterización medioambiental de los equipos (SIA, 2000). Los fabricantes de semiconductores que empleen los factores de emisión proporcionados por el proveedor de los equipos de herramientas de proceso deben asegurarse que los factores de emisión sean aplicables a sus procesos específicos de fabricación. Los métodos de fabricación que utilicen parámetros de proceso (p. ej., presión, tasa de flujo) que se aparten de las condiciones del proceso nominal, pueden tener factores de emisión diferentes de los proporcionados por el fabricante de las herramientas.

Factores de las tecnologías de control de las emisiones para los métodos de Nivel 2

Las tecnologías de control de las emisiones están desarrollándose rápidamente al ritmo de avance de las tecnologías de fabricación de los productos electrónicos. Los factores de emisión de las tecnologías de control por defecto Cuadro 6.6 están basados en pruebas de los dispositivos de control que han sido optimizados para procesos y herramientas específicos. Se espera que los resultados varíen entre las herramientas y según los índices de flujo. Los factores de emisión no son aplicables a todas las herramientas ni a todos los procesos en las instalaciones de fabricación de semiconductores, pantallas de cristal líquido o dispositivos fotovoltaicos. Los parámetros de eficiencia de destrucción por defecto para el Nivel 2 presentados en el Cuadro 6.6 son aplicables solamente cuando los compiladores del inventario pueden demostrar, mediante una comunicación con los responsables de las instalaciones y a través de la documentación consiguiente, que las tecnologías de control de las emisiones son operadas y mantenidas de conformidad con las especificaciones del fabricante. Si las compañías emplean otro tipo de dispositivos de reducción, para los métodos de Nivel 2a y 2b, deben suponer que la eficiencia de destrucción es 0.

Entre las hipótesis que se aplican a los factores de emisión de los métodos Nivel 2a y 2b para las tecnologías de control de las emisiones, se incluyen:

- (i) Las tecnologías específicas de control de las emisiones no están enumeradas; los factores de emisión para cada producto químico se han establecido sobre la base de los resultados logrados durante los ensayos de las tecnologías de control de las emisiones en las aplicaciones de fabricación de semiconductores;
- (ii) Los factores de emisión deben utilizarse sólo cuando la reducción se aplica a las emisiones que están dentro del intervalo operativo especificado por el fabricante del sistema de reducción para alcanzar o superar los factores enumerados en el Cuadro 6.6;
- (iii) Los factores de emisión se aplican sólo a aquella porción de las emisiones que pasa a través de un dispositivo de control correctamente operado y mantenido; estos factores no deben aplicarse cuando se prescinde del dispositivo de control, éste no opera de conformidad con las especificaciones del fabricante o no se mantiene según las especificaciones;
- (iv) Los factores de emisión no se aplican a las tecnologías de control de las emisiones que no pueden reducir el CF_4 con una eficiencia de destrucción o de eliminación (DRE) ≥ 85 por ciento, cuando el

¹⁵ Las tasas de uso del SF_6 de 50:50 representan un promedio para las regiones líderes de fabricación de TFT-FPD de Japón, República de Corea y Taiwán. Esta proporción ha sido facilitado por Nishida (2006) y Kim (2006).

¹⁶ Un ejemplo de método acreditado internacionalmente es el de Meyers *et al.* (2001).

CF₄ está presente como gas de entrada o como producto derivado y cuando todos los demás gases CF tienen un DRE ≥ 90 por ciento. Si los fabricantes emplean cualquier otro tipo de tecnología de control de las emisiones, cuando se utilizan los métodos de Nivel 2 se supone una eficiencia de destrucción de 0 por ciento.

Los factores de control de las emisiones por defecto de Nivel 2 del Cuadro 6.6, Parámetros de eficiencia por defecto para las tecnologías de reducción de las emisiones de los CF en la industria electrónica, fueron calculados a partir de datos proporcionados por los proveedores de equipos y de tecnologías de reducción y por los fabricantes de dispositivos electrónicos. Nótese que en los cálculos sólo se utilizaron datos sobre dispositivos de reducción específicamente diseñados para reducir los CF. Se recibieron datos sobre dispositivos de reducción por combustión (todos ellos utilizan algún tipo de combustible), dispositivos de reducción por plasma, dispositivos de reducción calentados eléctricamente y dispositivos catalíticos de reducción.

Los valores presentados en el Cuadro 6.6, Parámetros de eficiencia por defecto para las tecnologías de reducción de las emisiones de los CF en la industria electrónica, son el resultado de los datos recibidos relacionados con tecnologías optimizadas y con cada gas de entrada, y fueron redondeados al 5 por ciento próximo inferior (p. ej., un porcentaje promedio de 98 por ciento fue redondeado hacia abajo, a un valor de 0,95). Los promedios fueron redondeados hacia un valor inferior para reflejar que: (i) los dispositivos de control de las emisiones tienen una eficacia variable según cuál sea el gas para el cual se ha optimizado la destrucción y (ii) la eficacia de emisión de los dispositivos de control de las emisiones depende del tipo de herramienta en la cual han sido instalados (oblas de silicio de 150, 200 o 300 mm.), de la cantidad de gas CF que fluye a través de esa herramienta en particular y del flujo total de escape que pasa a través del dispositivo de control de las emisiones. Un dispositivo de control de las emisiones que puede destruir el 99 por ciento de un CF, cuando ha sido optimizado para destruir ese CF en una determinada herramienta, puede destruir menos del 95 por ciento de ese CF cuando ha sido optimizado para destruir otro gas, o cuando se lo utiliza en una herramienta para la cual no fue diseñado, o bien, si el flujo de gas CF de escape total sobrepasa un cierto límite. Los fabricantes de productos electrónicos y los de herramientas para la reducción de las emisiones deben garantizar que el sistema de reducción instalado esté bien dimensionado y en condiciones de mantenimiento, y que el dispositivo de control de las emisiones pueda alcanzar o superar el factor de emisión por defecto señalado en el Cuadro 6.6.

6.2.2.2 FLUIDOS DE TRANSFERENCIA TÉRMICA

Los factores de emisión por defecto para el método de Nivel 1 se presentan en el Cuadro 6.2. No existe un factor de emisión para el método de Nivel 2 para estimar las emisiones derivadas de la evaporación de los fluidos de transferencia térmica.

6.2.3 Elección de los datos de la actividad

Los datos de la actividad para la industria electrónica consisten en datos sobre las ventas de gases y sobre el uso de las cantidades anuales de sustrato electrónico procesado (p. ej., m² de silicio procesado para los semiconductores). En el caso de los métodos de Nivel 2, que los usan más intensivamente, se necesitan datos sobre las compras de gases al nivel de las compañías o de las plantas. Para el método de Nivel 1, los compiladores del inventario deben determinar el área total de la superficie de los sustratos electrónicos procesados para un año determinado. El consumo de silicio puede estimarse utilizando una edición apropiada de la base de datos del observatorio *World Fab Watch* (WFW), una publicación trimestral de *Semiconductor Equipment & Materials International* (SEMI)¹⁷. La base de datos contiene una lista de plantas (de producción, también de investigación y desarrollo, plantas piloto, etc.) a escala mundial, con información sobre ubicación, capacidad de diseño, dimensión de las obleas de sustrato y muchas otras. Por igual, la base de datos del SEMI «*Flat Panel Display Fabs on Disk*» proporciona una estimación del consumo de vidrio para la fabricación de TFT-FPD al nivel mundial.

Los datos de la actividad del Cuadro 6.7 reflejan las cifras de la capacidad de diseño. Las plantas de fabricación de semiconductores y de TFT-FPD no operan según la capacidad de diseño por periodos prolongados, tales como un año entero. En vez de ello, la capacidad fluctúa según la demanda de los productos. Las estadísticas industriales públicas disponibles sobre la fabricación de semiconductores muestran que la utilización de la capacidad mundial anual promedio durante el periodo 1991 – 2000 varió entre un 76 y un 91 por ciento, con un promedio de un 82 por ciento y con un valor más probable del 80 por ciento. Cuando no se disponga de datos

¹⁷ En inglés, el término «*fab*» es sinónimo de instalación de manufactura en cámara blanca. Las plantas que manufacturan semiconductores y pantallas planas (en inglés, *manufacturing plants*) se denominan a menudo plantas de fabricación (en inglés, *fabrication plants*): de ahí, la abreviatura en inglés, «*fab*».

sobre la utilización de la capacidad específica de un país, para la fabricación de semiconductores se sugiere emplear una utilización de la capacidad del 80 por ciento. Este criterio debe emplearse de manera coherente para la serie temporal de las estimaciones. No se dispone de datos públicos sobre la utilización de la capacidad en la fabricación de TFT-FPD. La industria de la fabricación de TFT-FPD, así como la de fabricación de semiconductores, disminuye los precios de los productos para mantener la utilización práctica más alta de la capacidad. En consecuencia, se sugiere emplear, por analogía, un valor de 80 por ciento para estimar el consumo de sustrato de vidrio, utilizando las capacidades de diseño proporcionadas en el Cuadro 6.7 para los fabricantes de TFT-FPD por país. Para la fabricación de PV, los datos publicados sobre la utilización de la capacidad varían entre 77 y 92 por ciento, con un promedio de 86 por ciento para los años 2003 y 2004. Por lo tanto, la cifra recomendada a utilizar por defecto para C_u (véase la Ecuación 6.1) es de 86 por ciento.

Al estimar las emisiones generadas durante la fabricación de PV, se debe dar cuenta de la fracción de la industria que efectivamente emplea los CF (C_{PV} en la Ecuación 6.1). Debido a que estudios recientes indican que entre un 40 y un 50 por ciento de la fabricación de PV utiliza efectivamente los CF, y que su empleo tiende a aumentar, el valor por defecto recomendado para C_{PV} es de 0,5.

El Cuadro 6.7 es un resumen de las capacidades para 2003, 2004 y 2005, correspondientes a los países que, en total, en 2003 daban cuenta de más del 90 por ciento de la capacidad mundial.

CUADRO 6.7 CAPACIDADES TOTALES DE DISEÑO DE SILICIO (Si) Y DE VIDRIO POR PAÍS (mm ²) PARA 2003, 2004 Y 2005						
Totales por país	Capacidades de diseño anual de Si, mm ²			Capacidades de diseño anual de vidrio, mm ²		
	2003 ¹	2004 ²	2005 ²	2003 ¹	2004 ²	2005 ²
Alemania	0,1622	0,1622	0,1622	NA	NA	NA
Australia	0,0008	0,0008	0,0008	NA	NA	NA
Austria	0,0201	0,0201	0,0201	NA	NA	NA
Bélgica	0,0040	0,0040	0,0040	NA	NA	NA
Canadá	0,0041	0,0041	0,0041	NA	NA	NA
China	0,1436	0,1982	0,3243	0,0432	0,0432	0,8154
China, Hong Kong	0,0059	0,0059	0,0059	NA	NA	NA
Corea del Sur	0,3589	0,3742	0,3937	5,8789	9,4679	12,4857
Eslovaquia	0,0043	0,0043	0,0043	NA	NA	NA
Estados Unidos	0,6732	0,6921	0,7190	0,0000	0,0000	0,0000
Francia	0,0653	0,0674	0,0674	NA	NA	NA
Hungría	0,0006	0,0006	0,0006	NA	NA	NA
India	0,0128	0,0128	0,0128	NA	NA	NA
Irlanda	0,0175	0,0430	0,0430	NA	NA	NA
Israel	0,0310	0,0310	0,0564	NA	NA	NA
Italia	0,0431	0,0431	0,0609	NA	NA	NA
Japón	0,9091	0,9235	0,9639	4,5746	5,3256	6,9201
Letonia	0,0019	0,0019	0,0019	NA	NA	NA
Malasia	0,0284	0,0284	0,0284	NA	NA	NA
Países Bajos	0,0301	0,0301	0,0301	0,0209	0,0209	0,0209
Reino Unido	0,0597	0,0597	0,0936	NA	NA	NA
República Checa	0,0057	0,0057	0,0057	NA	NA	NA
República de Bielorrusia	0,0077	0,0077	0,0077	NA	NA	NA
Rusia	0,0250	0,0250	0,0325	NA	NA	NA
Singapur	0,1730	0,1730	0,1985	0,2821	0,2821	0,2821
Sudáfrica	0,0021	0,0021	0,0021	NA	NA	NA
Suecia	0,0019	0,0019	0,0019	NA	NA	NA
Suiza	0,0098	0,0098	0,0098	NA	NA	NA
Tailandia	0,0000	0,0000	0,0094	NA	NA	NA
Total global	3,3206	3,4972	3,8849	15,0572	23,9959	33,7459
Turquía	0,0000	0,0000	0,0000	NA	NA	NA
Vietnam	0,0000	0,0000	0,0000	NA	NA	NA

¹ Los totales por país incluyen las fábricas en producción
 Los totales por país incluyen la fábricas en construcción y las anunciadas
 NA = no se aplica
 Fuentes: Extraídos de la *World Fab Watch Database*, edición de enero de 2004 de *Semiconductor Manufacturing and Flat Panel Display Fabs on Disk Database* (Strategic Marketing Associates, 2004a), edición de octubre de 2004 de *TFT-FPD Manufacturing* (Strategic Marketing Associates, 2004b).

Alemania	0,817
Australia	0,135
Austria	0,0307
Canadá	0,0154
Corea del Sur	0,462
Dinamarca	0,00254
España	0,715
Estados Unidos	1,02
Francia	0,162
Italia	0,100
Japón	3,72
Noruega	0,0138
Portugal	0,115
Reino Unido	0,0269
Suecia	0,377
Suiza	0,00238
^a Las capacidades para todas las tecnologías de fabricación de PV incluyen todas aquellas que pueden no usar los CF durante la fabricación de PV; La utilización de la capacidad promedio mundial para 2003 = 86% Fuente: IEA, 2004. Países que participaron en el estudio sobre PV.	

6.2.4 Exhaustividad

En la mayoría de los países debería ser posible lograr una contabilización exhaustiva de las emisiones provenientes de la industria de los semiconductores pues existe un número limitado de compañías y de plantas. Hay cuatro problemas relacionados con la exhaustividad que deben ser abordados:

- **Otros productos derivados:** Un número de productos derivados se generan por transformación, como resultado del uso de los CF en la limpieza de las cámaras y en el decapado. Como se ha destacado más arriba, la formación de CF₄ y de C₂F₆ puede resultar de la descomposición de otros gases de CF. Asimismo, se ha observado la formación de CF₄ en la limpieza de las cámaras de CVD de bajo-k. En este caso, para estimar las emisiones con exactitud debe emplearse el método de Nivel 3.
- **Nuevos productos químicos:** La exhaustividad será un tema importante en el futuro, a medida que la industria evalúa y adopta nuevos procesos químicos para mejorar sus productos. Los esfuerzos generales de la industria para reducir las emisiones de los CF están acelerando también la prospección de nuevos productos químicos. En consecuencia, en esta industria es una *buena práctica* incorporar un mecanismo que dé cuenta de los gases de efecto invernadero que no estén enumerados en el informe Tercer Informe de Evaluación del IPCC (TAR) (p. ej., C₄F₆, C₅F₈, Fluorinerts[™] y Galdens[®]). Estos nuevos materiales de CF poseen altos PCA o pueden producir emisiones de productos derivados con PCA elevado.
- **Otras fuentes:** Una pequeña cantidad de CF puede liberarse durante el manejo de los gases (p. ej., la distribución) y a través de fuentes tales como las plantas a escala de investigación y desarrollo (p. ej., las universidades) y los proveedores de herramientas. No se piensa que estas emisiones sean significativas (p. ej., menos del 1 por ciento de las emisiones totales de la industria).
- **Otros productos y procesos:** Se ha identificado el uso de los CF en las aplicaciones emisivas de la industria electrónica, que incluyen: sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS, del inglés, *micro-electro-mechanical*

systems)¹⁸, fabricación de discos duros, ensayos de dispositivos (líquido de CF), soldadura por reflujo en fase vapor¹⁹ y limpieza de precisión²⁰.

6.2.5 Desarrollo de una serie temporal coherente

El uso de los CF en la industria de los semiconductores comenzó a fines de la década de 1970 y se aceleró significativamente a comienzos de la década de 1990. La determinación de un nivel de emisiones del año de base puede presentar dificultades pues se dispone de pocos datos sobre las emisiones ocurridas antes de 1995. Si las estimaciones de las emisiones históricas estuvieron basadas en hipótesis simples (p. ej., el uso es igual a las emisiones), entonces es posible mejorar estas estimaciones mediante la aplicación de los métodos descritos más arriba. Si no se dispone de los datos históricos que permiten el empleo de los métodos de Nivel 3 ó 2, entonces puede usarse retrospectivamente el método de Nivel 1 con parámetros de emisión por defecto. Tanto el Nivel 1 como el 2 pueden aplicarse entonces simultáneamente a los años en los que los datos comiencen a estar disponibles, con el fin de proporcionar un criterio de comparación o de referencia. Debe realizarse de acuerdo con la orientación del Volumen 1, Capítulo 5.

Para garantizar un registro coherente de las emisiones a través del tiempo, el compilador del inventario debe recalcular las emisiones de los CF para todos los años declarados, cada vez que se cambien los procedimientos de cálculo para las emisiones (p. ej., si un compilador del inventario cambia del uso de valores por defecto al uso de los valores reales determinados al nivel de la planta). Si no se dispone de datos específicos de las plantas para todos los años de una serie temporal, el compilador debe considerar cómo utilizar los datos actuales de las plantas para recalcular las emisiones para estos años. Puede ser posible aplicar los parámetros de emisión actuales y específicos de las plantas a los datos sobre las ventas de los años anteriores, siempre y cuando las operaciones de las plantas no hayan cambiado sustancialmente. Una repetición tal de los cálculos es necesaria para garantizar que todo cambio en las tendencias de emisión corresponda a un cambio real y no a un artificio producido por un cambio de procedimiento.

6.3 EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE

El empleo del método de Nivel 3 produce un inventario menos incierto. Dados el limitado número de plantas y el monitoreo estricto de los procesos de producción al nivel de las plantas, la recopilación de los datos necesarios para los métodos de Nivel 2b o 3 debería ser técnicamente factible. Para obtener las incertidumbres, los compiladores del inventario deben solicitar consejos a la industria, empleando los métodos para obtener los dictámenes de expertos delineados en el Volumen 1, Capítulo 3.

El más incierto de todos los métodos es el de Nivel 1. El empleo de un único factor para dar cuenta de las emisiones de los CF provenientes de una diversidad de semiconductores constituye una simplificación flagrante. Los factores presentados en el Cuadro 6.2 están fuertemente sesgados hacia la fabricación de productos avanzados de memoria y de lógica, producidos mediante tecnologías cuya antigüedad data de fines de la década de 1990, con estructuras de 3 hasta 5 capas respectivamente y manufacturados sobre obleas de silicio. En los países que están fabricando actualmente productos con tecnologías de vanguardia (y que no están implementando medidas para reducir las emisiones de CF) los factores deben ser mayores, mientras que los países que fabrican productos empleando las tecnologías más antiguas o que fabrican dispositivos más simples utilizarán los mismos factores o incluso factores menores.

Los factores de emisión de Nivel 1 para la fabricación de TFT-FPD representan un promedio ponderado de las emisiones agregadas estimadas de PFC por unidad de área del vidrio de sustrato consumido durante la fabricación de TFT-FPD, en las áreas donde los datos estaban disponibles (Burton, 2004b). Para las emisiones estimadas declaradas para el Japón se emplearon los factores de Nivel 2b para la fabricación de semiconductores, tomados del documento *Orientación del IPCC para las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (IPCC, 2000), en la fabricación de semiconductores (Nishida *et al.*, 2004). No se declaró el método utilizado para estimar las emisiones de los fabricantes de TFT-

¹⁸ Las emisiones provenientes de la fabricación de sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS) pueden estimarse mediante métodos similares a los empleados para otros subsectores de la electrónica. Se necesitan factores de emisión y de reducción específicos de las compañías. También pueden utilizarse cantidades muy pequeñas de CF en las instalaciones o laboratorios de investigación y desarrollo.

¹⁹ Las emisiones provenientes de la soldadura por reflujo en fase vapor pueden estimarse iguales a las compras anuales netas de CF realizadas para el mantenimiento de los equipos de soldadura por reflujo en fase vapor

²⁰ Las emisiones provenientes de la limpieza de precisión deben contabilizarse en la Sección 7.2 (Solventes) de este Volumen.

FPD de Taiwán (Leu *et al.*, 2004). Sin embargo, posteriormente Leu (2004) declaró un factor agregado de emisión de magnitud similar al factor desarrollado por Burton (2004b). La incertidumbre en el factor de emisión de Nivel 1 para la fabricación de TFT-FPD es probablemente grande, pero no se conoce actualmente.

Al emplear el método de Nivel 3 para la fabricación de semiconductores y de TFT-FPD, las estimaciones resultantes de las emisiones serán más exactas que las de los métodos de Nivel 2a, 2b ó 1, por un orden del ± 30 por ciento (con un intervalo de confianza del 95 por ciento). La incertidumbre asociada a la eficacia de la tecnología de control de las emisiones es la que parece contribuir más a esta incertidumbre, en particular debido a la variabilidad en el tiempo de funcionamiento de los dispositivos de control de las emisiones y en los índices de flujo hacia estos dispositivos que pueden sobrepasar sus límites de diseño.

Las estimaciones de las emisiones provenientes del uso de fluidos de transferencia térmica que emplean el método de Nivel 2, serán más exactas que las del método de Nivel 1, por un orden del ± 20 por ciento (con un intervalo de confianza del 95 por ciento).

6.3.1 Incertidumbres del factor de emisión

Las incertidumbres asociadas a los factores de emisión sugeridos para los métodos de Nivel 2b y 2a se presentan en el Cuadro 6.9, para la fabricación de semiconductores, y en el Cuadro 6.10, para la fabricación de TFT-FPD. Los factores fueron desarrollados específicamente para esta orientación. Para el Nivel 2b, los errores relativos para cada entrada (proceso y gas, en el caso del Nivel 2b) fueron estimados como la desviación estándar de los factores proporcionados por un grupo de expertos, normalizados al promedio simple (no ponderado) y redondeados a una cifra significativa. Luego, se duplicó la estimación para cada valor para estimar el intervalo de confianza del 95 por ciento. Se utilizó el mismo procedimiento para estimar los errores relativos para los factores de formación de productos (B). Las estimaciones correspondientes para el método de Nivel 2a fueron derivadas de las estimaciones de Nivel 2b, utilizando las estimaciones sobre el uso de gas empleadas en el desarrollo de los factores de emisión (véase la Sección 6.2.2, Nivel 2).

Los factores de emisión de Nivel 1 tendrán un intervalo de incertidumbre sesgado hacia valores próximos a cero, extendiéndose superiormente hasta un 200 por ciento (con un intervalo de confianza del 95 por ciento para la fabricación de semiconductores y de TFT-FPD). No se dispone de estimaciones de incertidumbre para la fabricación de PV.

6.3.2 Incertidumbres en los datos de la actividad

En los métodos de Nivel 2a y 2b, la unidad de actividad considerada para estimar las emisiones provenientes de la producción de semiconductores, TFT-FPD y PV es el consumo de gas. Éste puede medirse o estimarse a partir de datos sobre las compras de gas y requiere que se conozca *h*, el resto del gas no utilizado que se devuelve a los proveedores de gas en los contenedores de transporte. Las incertidumbres (con intervalo de confianza del 95 por ciento) asociadas al consumo de gas y al resto *h*, sea éste medido o estimado utilizando el dictamen de expertos, se muestran en el Cuadro 6.10, Estimaciones por defecto de los errores relativos (%) de Nivel 2 asociados a los factores de emisión de los CF para la fabricación de LCD, con un intervalo de confianza del 95 por ciento.

En el método de Nivel 1, la unidad de actividad considerada es el consumo de sustrato. Las incertidumbres asociadas a los datos de la actividad de Nivel 1 se atribuyen principalmente a la ausencia de entradas en las bases de datos sobre WFW y FPD. Una estimación de la fiabilidad de las entradas derivadas de los WFW, en el Cuadro 6.7, da un valor de ± 10 por ciento (con un intervalo de confianza del 95 por ciento), lo cual refleja los errores debidos a las entradas faltantes e incorrectas en la base de datos. El intervalo de confianza del 95 por ciento respecto de la utilización de la capacidad durante el periodo 1991-2000 es de ± 12 puntos porcentuales. Se supone que las entradas correspondientes para la fabricación de TFT-FPD y de PV son similares a las de la fabricación de semiconductores.

CUADRO 6.9														
ESTIMACIONES POR DEFECTO DE LOS ERRORES RELATIVOS (%) DE NIVEL 2 ASOCIADOS A LOS FACTORES DE EMISIÓN DE CF PARA LA FABRICACIÓN DE SEMICONDUCTORES, CON UN INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95 POR CIENTO														
Gas de proceso (i)	Gases de efecto invernadero con PCA del TIE									Gases de efecto invernadero sin PCA del TIE			Productos derivados CF que no producen GEI	
	CF₄	C₂F₆	CHF₃	CH₂F₂	C₃F₈	c-C₄F₈	NF₃ Remoto	NF₃	SF₆	C₄F₆	C₅F₈	C₄F₈O	F₂	COF₂
Nivel 2a														
1-Ui	15	30	100	400	20	80	400	70	300	300	80 [†]	40	NA	NA
B_{CF4}	NA	90	300	200	60	100	200	200	NA	200	100 [†]	80	200	200
B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	200	NA	NA	NA	200	200	NA	NA	NA
B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	40	NA	NA
Nivel 2b														
Decapado 1-Ui	60	100	100	700	NA	200	NA	300	300	300	200 [†]	NA	NA	NA
CVD 1-Ui	10	30	NA	NA	0.4	30	400	70	NA	NA	30 [†]	40	NA	NA
Decapado B_{CF4}	NA	200	300	200	NA	200	NA	NA	NA	200	200 [†]	NA	NA	NA
Decapado B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	200	NA	NA	NA	200	200 [†]	NA	NA	NA
CVD B_{CF4}	NA	80	NA	NA	60	60	200	200	NA	NA	60 [†]	80	200	200
CVD B_{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B_{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	40	NA	NA

Notas: NA significa que, según la información disponible actualmente, no se aplica al caso.
^{*} Los valores que sobrepasan el 100% implican una distribución sesgada hacia valores próximos de cero y que se extiende superiormente hasta el valor dado.
[†] La estimación se apoya en una analogía con el c-C₄F₈, pues los datos disponibles sobre el C₅F₈ fueron insuficientes para estimar el intervalo de confianza.

CUADRO 6.10 ESTIMACIONES POR DEFECTO DE LOS ERRORES RELATIVOS (%) DE NIVEL 2 ASOCIADOS A LOS FACTORES DE EMISIÓN DE LOS CF PARA LA FABRICACIÓN DE LCD, CON UN INTERVALO DE CONFIANZA DEL 95 POR CIENTO														
Gas de proceso (i)	Gases de efecto invernadero con PCA del TIE									Gases de efecto invernadero sin PCA del TIE			Productos derivados CF que no producen GEI	
	CF ₄	C ₂ F ₆	CHF ₃	CH ₂ F ₂	C ₃ F ₈	c-C ₄ F ₈	NF ₃ Remoto	NF ₃	SF ₆	C ₄ F ₆	C ₅ F ₈	C ₄ F ₈ O	F ₂	COF ₂
Nivel 2a														
1-Ui	50	NA	8	NA	NA	5	70	20	20	NA	NA	NA	NA	NA
B _{CF4}	NA	NA	30	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B _{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	20	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B _{C2F6}	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Nivel 2b														
Decapado 1-Ui	50	100	8	NA	NA	5	NA	60	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD 1-Ui	NA	NA	NA	NA	NA	NA	70	20	6	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B _{CF4}	NA	NA	30	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B _{CHF3}	NA	NA	NA	NA	NA	20	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Decapado B _{C2F6}	NA	NA	40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B _{CF4}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B _{C2F6}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CVD B _{C3F8}	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Notas: NA significa que, según la información disponible actualmente, no se aplica al caso.

6.4 GARANTÍA DE CALIDAD/CONTROL DE CALIDAD (GC/CC), GENERACIÓN DE INFORMES Y DOCUMENTACIÓN

6.4.1 Garantía de calidad / Control de calidad (GC/CC)

Es una *buena práctica* efectuar verificaciones de control de calidad como se indica en el Volumen 1, Capítulo 6, así como una revisión de expertos de las estimaciones de emisiones. También pueden ser aplicables verificaciones adicionales de control de calidad, como las esbozadas en el Volumen 1, así como procedimientos de garantía de calidad, en particular si al determinar las emisiones de esta categoría de fuente se utilizan métodos de nivel superior. Se alienta a los compiladores del inventario a utilizar un método de GC/CC de nivel superior para las *categorías principales* identificadas en el Volumen 1, Capítulo 4.

En el Volumen 1, Capítulo 6, se incluye también una orientación general adicional para los procedimientos de GC/CC de nivel superior. Debido a la naturaleza altamente competitiva de la industria de los semiconductores, deben tomarse medidas para incorporar el manejo de las informaciones confidenciales al proceso de verificación. Los métodos utilizados deben documentarse y debe considerarse la realización de auditorías periódicas sobre las mediciones y los cálculos de datos. Debe considerarse también la realización de una auditoría de GC sobre los procesos y los procedimientos.

6.4.2 Generación de informes y documentación

Deben tomarse precauciones para no incluir las emisiones de los HFC empleados como sustitutos de las SAO conjuntamente con los HFC utilizados en la fabricación de semiconductores. Es una *buena práctica* documentar y archivar toda la información requerida para producir las estimaciones del inventario de emisiones nacionales, como se indica en el Volumen 1, Sección 6.11. No resulta práctico incluir toda la documentación en el informe sobre el inventario nacional. Sin embargo, el inventario debe incluir resúmenes de los métodos utilizados y referencias a las fuentes de datos, de modo que las estimaciones de emisiones declaradas resulten transparentes y que las etapas de su cálculo puedan ser reproducidas.

Las declaraciones explícitas de las emisiones de esta industria mejorarán la transparencia y la comparación de las emisiones. Dado que esta industria emite un cierto número de gases de CF, la declaración por especie individual de gas en vez de por tipo de producto químico mejorará también la transparencia y la utilidad de estos datos. Los esfuerzos que se realicen para aumentar la transparencia deben tomar en consideración la protección de la información confidencial de las compañías en relación con el uso de gases específicos. En los países donde hay tres o más fabricantes, esta información puede protegerse mediante la agregación, al nivel nacional, de los datos sobre emisiones de gases específicos. En el Cuadro 6.11, Información necesaria para una transparencia total de las estimaciones de emisiones provenientes de la fabricación de semiconductores, se indica la información de respaldo necesaria para ofrecer una transparencia total en las estimaciones de las emisiones declaradas.

Para el Nivel 3, la *buena práctica* consiste en documentar el desarrollo de los factores de emisión específicos de las compañías y en explicar las desviaciones respecto de los valores genéricos por defecto. Dadas las consideraciones relativas a la confidencialidad, los compiladores del inventario pueden efectuar una agregación de la información proporcionada por los diferentes fabricantes. En los casos en los que los fabricantes de un país hayan declarado factores de emisión o de conversión diferentes para un determinado CF, un proceso o un tipo de proceso, los compiladores del inventario pueden proporcionar la variedad de factores declarados y utilizados.

CUADRO 6.11				
INFORMACIÓN NECESARIA PARA UNA TRANSPARENCIA TOTAL DE LAS ESTIMACIONES DE LAS EMISIONES PROVENIENTES DE LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS ELECTRÓNICOS				
Datos	Nivel 1	Nivel 2a	Nivel 2b	Nivel 3
Área de la superficie total de sustrato electrónico procesado (p. ej., m ² de silicio, m ² de vidrio)	X			
Utilización de la capacidad para la fabricación de semiconductores, de TFT-FPD y PV	X			
Fracción de la capacidad de fabricación de PV que emplea gases CF	X			
Emisiones de cada gas CF (en vez de agregadas para todos los CF)		X	X	X
Ventas/compras de cada CF		X		
Masa de cada CF empleado en cada proceso o tipo de proceso			X	X
Fracción de cada gas empleado en los procesos con tecnologías de control de emisiones		X	X	X
Tasa de uso para cada CF, para cada proceso o cada tipo de proceso (esta información, y la que sigue más abajo, es necesaria sólo si no se emplea el factor por defecto).				X
Fracción de cada CF transformado en CF ₄ para cada proceso o tipo de proceso				X
Fracción de gas que permanece en el contenedor de transporte				X
Fracción de cada CF destruido por la tecnología de control de las emisiones				X
Fracción de producto derivado CF ₄ destruido por la tecnología de control de las emisiones				X

Referencias

- Agnostinelli, G., Dekkers, H. F. W., DeWolf, S. and Beaucarne, G. (2004). “Dry Etching and Texturing Processes for Crystalline Silicon Solar Cells: Sustainability for Mass Production”, presented at the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 2004.
- Alsema, E. A., Bauman, A. E., Hill, R. and Patterson, M. H. (1997) “Health, Safety and Environmental Issues in Thin Film Manufacturing”, 14th European PV Solar Energy Conference, Barcelona, Spain. 1997.
- Burton, C. S. (2004a). “Uses and Air Emissions of Liquid PFC Heat Transfer Fluids from the Electronics Sector: Initial Findings”, report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, October 2004.
- Burton, C. S. (2004b). “PFC Uses, Emissions, and Trends in FPD Manufacture: An Update”, draft report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, June 2004.
- Burton, C. S. (2006). “Sources and Methods Used to Develop PFC Emission Factors from the Electronics Sector”, report prepared for U. S. EPA’s Climate Change Division, February 2006.
- Cowles, D. (1999) “Oxide Etch Tool Emissions Comparison for C5F8 and C4F8 Process Recipes”, presented at A Partnership for PFC Emissions Reductions, SEMICON Southwest 99, Austin, TX. October 1999.
- Fthenakis, V. (2005) Personal communication to S. Bartos on 5 February 2005 of data tables quantifying historical and current CF₄ and C₂F₆ usage in PV manufacture for U. S. and Europe.
- Fthenakis, V. (2006) Personal communication to S. Burton and S. Bartos explaining proposal to begin monitoring FC emissions from European PV industry. Feb. 6, 2006.
- IEA (2004). ‘Trends in Photovoltaic Applications: Survey report of selected IEA Countries between 1992 – 2003’, Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS), International Energy Agency, Report IEA-PVPS T1-13:2004, September 2004.
- IPCC (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., Tanabe K. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- ITRS (2004), “International Technology Roadmap for Semiconductors” available at <http://public.itrs.net/report.htm>
- Kim, D-H., (2006) 9 January 2006 Personal communication to Hideki Nishida identifying the historical average (50:50) proportion of SF₆ usage for etching and CVD chamber-cleaning in Japanese, Korean and Taiwan TFT-FPD manufacture.
- Leu, C-H., (2004) “SF₆ Abatement Strategy in Taiwan”, presented at SF₆ Power Reduction Partnership for Electric Power Systems, Scottsdale, Az., 1-3 December 2004.
- Leu, C-H *et al.* (2004) “PFC emissions Abatement for TFT-LCD Industry in Taiwan”, available in the Proceedings of the 15th Annual Earth Technology Forum, Washington, D. C., 13-15 April 2004.
- Maycock, P. (2005) “PV market update: global PV production continues to increase”, Renewable Energy World, Vol. 8 (4), pp 86-99.
- Meyers, J., Maroulis, P., Reagan, B. and Green, D. (2001). “Guidelines for Environmental Characterization of Semiconductor Equipment”, Technology Transfer #01104197A-XFR, pub. International SEMATECH, Austin, Texas, USA. December 2004, See: www.sematech.org/docubase/document/4197axfr.pdf.
- Nishida, H. *et al.* (2004) “Voluntary PFC Emission Reduction in the LCD Industry”, available in the Proceedings of the 15th Annual Earth Technology Forum, Washington, D. C., 13 – 15 April 2004.
- Nishida, H., Marsumura, K., Kurokawa, H., Hoshino, A. and Masui, S. (2005), “PFC emission-reduction strategy for the LCD industry”, J. Society for Information Display, Vol 13, pp. 841-848 (2005).
- Nishida, H. (2006). 7 January 2006 Personal communication to D-H. Kim confirming historical average 50:50 proportion of SF₆ usage for etching and CVD chamber-cleaning in Japan, Korean and Taiwan TFT-FPD manufacture.
- Phylipsen, G. J. M. and Alsema, E. A., (1995) “Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules”, report prepared for Netherlands Agency for Energy and the Environment, Report No. 95057, September 1995.

- Rentsch, J., Schetter C., Schlemm H., Roth, K. and Preu, R. (2005). "Industrialization of Dry Phosphorous Silicate Glass Etching and Edge Isolation for Crystalline Silicon Solar Cells", Presented at the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona, Spain. 6-10 June, 2005.
- Sekiya, A. (2003). "Climate-Friendly Alternative Refrigerant and the Others: New Evaluations for sustainability", The Earth Technologies Forum, Washington, D. C., 23 April, 2003.
- Shah, A., Meier, J., Buechel, A., Kroll, U., Steinhauser, J., Meillaud, F. and Schade, H. (2004). "Toward Very Low-Cost Mass Production of Thin-film silicon Photovoltaic (PV) Solar Modules on Glass", presented at ICCG5 Conference in Saarbrücken, Germany, July 2004.
- SIA (2000). "Equipment Environmental Characterisation Guidelines", Revision 3.0, Semiconductor Industry Association (SIA), San Jose, California, USA, February 2000
- Strategic Marketing Associates (2004a). WORLD FAB WATCH: The Industry's Encyclopedia of Wafer Fabs Since 1994, January 2004 Edition.
- Strategic Marketing Associates (2004b). WORLD FAB WATCH: The Industry's Encyclopedia of Wafer Fabs Since 1994, October 2004 Edition.
- Tuma, P.E. and Tousignant, L. (2001). "Reducing Emissions of PFC Heat Transfer Fluids," Presented at Semicon West, San Francisco, July 2001.
- U.S. EPA (2005). U.S. Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. Greenhouse Gas and Sinks: 1990-2003, EPA 430-R-05-003, April 2005.