

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 682 805**

51 Int. Cl.:

**C08G 63/181** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.03.2015 PCT/NL2015/050152**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.09.2015 WO15137805**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.03.2015 E 15715479 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.05.2018 EP 3116932**

54 Título: **Poliéster y procedimiento destinado a la preparación de dicho poliéster**

30 Prioridad:

**11.03.2014 NL 2012407**  
**11.03.2014 US 201461951217 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**21.09.2018**

73 Titular/es:

**SYNVINA C.V. (100.0%)**  
**Zekeringstraat 29**  
**1014 BV Amsterdam, NL**

72 Inventor/es:

**KOLSTAD, JEFFREY JOHN;**  
**WANG, BING;**  
**SCHIAVONE, ROBERT JOSEPH;**  
**ANDREWS, MARION L.;**  
**PASCHKE, EDWARD E. y**  
**VAN BERKEL, JESPER GABRIËL**

74 Agente/Representante:

**MANRESA VAL, Manuel**

**ES 2 682 805 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Poliéster y procedimiento destinado a la preparación de dicho poliéster.

5 La presente invención se refiere a un poliéster y a un procedimiento destinado a la preparación de dicho poliéster. Más en particular, la presente invención se refiere a un poliéster que comprende grupos 2,5-furandicarboxilato y grupos etilenglicol y a un procedimiento destinado a preparar dicho poliéster.

10 El ácido 2,5-furandicarboxílico (FDCA) es un diácido que se puede producir a partir de fuentes naturales tales como los carbohidratos. Se dan a conocer las vías de preparación del mismo utilizando la oxidación al aire de furanos 2,5-disustituídos, tales como el 5-hidroximetilfurfural o éteres del mismo, con catalizadores que comprenden Co y Mn, por ejemplo, en los documentos WO 2010/132740, WO 2011/043660 y WO 2011/043661.

15 En la patente US 2551731 se describe la preparación de poliésteres y poliésteramidas haciendo reaccionar glicoles con ácidos dicarboxílicos, de los que por lo menos uno comprende un anillo heterocíclico, tal como 2,5-FDCA. En unas condiciones de polimerización en estado de fusión, utilizando metóxido de sodio y magnesio como catalizador, se hizo reaccionar éster dimetilico de FDCA y 2,5 equivalentes de etilenglicol o FDCA y 1,6 equivalentes de etilenglicol en una etapa de esterificación o una etapa de transesterificación, respectivamente, a presión ambiente entre 160 y 220 °C, y a continuación se realizó una policondensación entre 190 y 220 °C a una presión de unos pocos mm Hg. El proceso de policondensación dura aproximadamente entre 5 y más de 7 horas. Se describió que el producto presentaba una temperatura de fusión comprendida entre 205 y 210 °C y proporcionaba fácilmente filamentos de la masa fundida.

25 En la patente US 2009/0124763 se describen unos poliésteres con un grupo 2,5-furandicarboxilato dentro de la cadena principal del polímero y que presentan un grado de polimerización de 185 superior y 600 o inferior. Dichos polímeros se preparan en un procedimiento de tres etapas que implica la esterificación del 2,5-FDCA o la transesterificación del diéster del mismo con un diol, y una segunda etapa en la que se realiza la policondensación, y a continuación la polimerización en estado sólido como tercera etapa.

30 La primera etapa se realiza a presión ambiente a una temperatura dentro del intervalo comprendido entre 150 y 180 °C, mientras que la etapa de policondensación se realiza al vacío a una temperatura comprendida entre 180 a 230 °C. A continuación, se purifica el producto mediante la disolución del mismo en hexafluoroisopropanol, reprecipitación y secado, seguido por la tercera etapa, una polimerización en estado sólido a una temperatura comprendida entre 140 y 180 °C. En el caso de la preparación de poli(furandicarboxilato de etileno), las primeras dos etapas tardan más de 11 horas.

40 En el documento WO 2010/077133 se describe un procedimiento destinado a preparar poliésteres que comprenden furandicarboxilato en el que el diéster de FDCA se transesterifica con un diol, y la composición del éster obtenida de este modo se somete a policondensación. La policondensación se realiza durante un período de hasta 5 horas. A continuación, se puede someter el policondensado a polimerización en estado sólido. En un ejemplo, la polimerización en estado sólido se realizó durante 60 horas. Aunque el peso molecular del poliéster obtenido es razonablemente elevado, se considera demasiado larga la duración de la polimerización en estado sólido. Se describe una mejora en el documento WO 2013/062408, en la que el éster dimetilico de FDCA se transesterifica con etilenglicol o se utiliza bis(2-hidroxietil)-2,5-furandicarboxilato como material inicial. El producto de la transesterificación o dicho material inicial se somete a continuación a policondensación y, tras una etapa de cristalización/secado, el policondensado se somete a polimerización en estado sólido. Se demostró que la policondensación tarda tres horas. En un ejemplo, la polimerización en estado sólido tarda dos días.

50 En el documento WO 2013/120989 se describe un procedimiento continuo destinado a la preparación de poli(furandicarboxilato de etileno) en el que se mezcla FDCA o un diéster del mismo con etilenglicol a temperatura elevada para obtener una pasta o una solución homogénea, la pasta o solución se convierte en un producto de esterificación de FDCA y etilenglicol, el producto de esterificación se policondensa a una presión reducida, en el que la policondensación se realiza en dos etapas. Según un ejemplo, se hizo reaccionar el dimetiléster de FDCA con etilenglicol con una relación molar de 1:1,7. En dicho ejemplo, las etapas posteriores a la producción del producto esterificado duraron 5 horas. El producto de la policondensación se puede someter, si se pretende de este modo, a una polimerización en estado sólido.

60 En el documento KR 20140003167 se describe un polímero de poliéster con una transparencia excelente que se realiza utilizando un compuesto éster de furandicarboxilato originado a partir de biomasa con etilenglicol. En los ejemplos comparativos, también se ha utilizado ácido furandicarboxílico. La relación molar entre el éster de furandicarboxilato y el etilenglicol puede ser de 1:1,1 a 1:4. La relación entre el ácido furandicarboxílico y el etilenglicol varía entre 1:1,2 y 1:2. No se proporciona indicación alguna de que se hayan tomado medidas específicas para reducir el contenido de dietilenglicol en el poliéster resultante.

En la patente US 8420769 se dan a conocer unos poliésteres que se han preparado a partir de FDCA o el diéster del mismo con una mezcla de etilenglicol y dietilenglicol. La cantidad de dietilenglicol es de por lo menos un 50,1% en moles con respecto a la combinación de etilenglicol y dietilenglicol. El procedimiento de preparación puede tardar hasta 8,5 horas. Se afirma que el poliéster resultante presenta una resistencia al impacto mejorada.

5 En un experimento comparativo se ha demostrado que, cuando no se añade dietilenglicol como comonomero, el poliéster resultante presenta todavía pequeños picos en el espectro de <sup>1</sup>H-RMN en desplazamientos de aproximadamente 4,2 y 4,8 ppm, lo que indica la presencia de grupos dietilenglicol. A partir de los picos se puede deducir que la cantidad de grupos dietilenglicol es de aproximadamente 0,05 mol/mol, basándose en la cantidad de grupos furandicarboxilato.

10 Dicha patente confirma el descubrimiento de los presentes solicitantes de que durante la formación del producto de la esterificación de FDCA y etilenglicol, se forma fácilmente dietilenglicol, que posteriormente se incorpora al poliéster que se obtiene durante la etapa siguiente de policondensación y la etapa opcional en estado sólido.

15 Los presentes solicitantes han descubierto que la incorporación de grupos dietilenglicol en el poliéster disminuye la temperatura de fusión, reduce la temperatura de vitrificación y el nivel de cristalización. Puesto que se conoce que el nivel de cristalización desempeña un papel en las propiedades mecánicas de los productos formados a partir de dichos poliésteres, se cree que la incorporación de grupos dietilenglicol en los poliésteres disminuye la estabilidad térmica y las propiedades mecánicas de dichos productos. Se ha descubierto que, cuando se produce un poliéster con un contenido reducido de grupos dietilenglicol, disminuyen los efectos negativos sobre la temperatura de fusión, la estabilidad térmica y las propiedades mecánicas. Por lo tanto, la diferencia de lo que se describe en la patente US 8420769, se puede producir un poliéster térmicamente más estable que presente unas mejores propiedades mecánicas reduciendo la cantidad de grupos dietilenglicol en lugar de aumentar dicha cantidad.

25 Por consiguiente, la presente invención proporciona un poliéster que comprende unidades de 2,5-furandicarboxilato de etileno, cuyo poliéster comprende asimismo grupos dietilenglicol, siendo el contenido de grupos dietilenglicol inferior a 0,045 en moles por mol de grupos 2,5-furandicarboxilato.

30 El contenido de grupos dietilenglicol en el poliéster se puede reducir mediante compuestos que pueden inhibir la formación de dietilenglicol a partir de etilenglicol. Por consiguiente, la presente invención proporciona además un procedimiento destinado a la preparación de un poliéster, en el que una mezcla inicial que comprende ácido 2,5-furandicarboxílico y etilenglicol o que comprende un éster dialquílico del ácido 2,5-furandicarboxílico y etilenglicol se somete a esterificación o transesterificación para formar una composición de éster, y la composición de éster obtenida de este modo se somete a policondensación en una presión reducida en presencia de un catalizador de la policondensación para obtener un policondensado, produciéndose la esterificación o transesterificación en presencia de un compuesto básico y/o un compuesto de amonio capaz de inhibir la formación de dietilenglicol. Con el procedimiento se obtiene un poliéster con una cantidad reducida de grupos dietilenglicol tal como en el poliéster descrito anteriormente.

40 Preferentemente, el contenido de grupos dietilenglicol en el poliéster según la presente invención es inferior a 0,040 mol/mol, más preferentemente inferior a 0,030 mol/mol. A modo de ventaja, el contenido de dietilenglicol es lo más bajo posible. Preferentemente, el poliéster no comprende grupo alguno de dietilenglicol. Sin embargo, un nivel de grupos dietilenglicol de 0,005 mol/mol puede resultar aceptable y puede formar un nivel mínimo. El poliéster según la presente invención comprende convenientemente 0,955 moles de grupos etileno por fracción molar de furandicarboxilato. Más preferentemente, el poliéster comprende poli(2,5-furandicarboxilato de etileno) que comprende además grupos dietilenglicol, alcanzando la cantidad de grupos dietilenglicol de como máximo 0,045 moles de grupos dietilenglicol por mol de 2,5-furandicarboxilato.

50 La reacción de esterificación o transesterificación se produce en presencia de un compuesto de amonio y/o un compuesto básico. Dichos compuestos se conocen a partir de la preparación de tereftalato de polietileno (PET). Se ha descubierto para la presente invención que se selecciona muy convenientemente el compuesto básico o de amonio de entre el grupo que comprende compuestos de tetraalquilamonio, colina, sales de metales alcalinos de ácidos carboxílicos, sales de metales alcalinotérreos de ácidos carboxílicos, sales de metales alcalinos básicos de minerales ácidos, hidróxidos de metales alcalinos, hidróxidos de amonio y combinaciones de los mismos. Los grupos alquilo de los compuestos de tetraalquilamonio presentan preferentemente entre 1 y 6, y más preferentemente entre 1 y 4 átomos de carbono. Los grupos alquilo pueden comprender uno o más sustituyentes, seleccionados convenientemente entre un átomo halógeno, un grupo hidroxilo, un grupo formilo, un grupo tiol, un grupo nitro y combinaciones de los mismos. Los ácidos carboxílicos presentan convenientemente entre 1 y 8 átomos de carbono, uno o más pueden estar sustituidos por un heteroátomo, tal como un átomo de oxígeno, azufre o nitrógeno. El ácido carboxílico puede ser alifático, cicloalifático o aromático. Los ácidos carboxílicos aptos comprenden ácido fórmico, ácido acético, ácido propiónico, pero también ácido furoico, ácido benzoico, ácido furandicarboxílico y combinaciones de los mismos. Las sales básicas de los ácidos minerales se obtienen convenientemente de ácidos polibásicos, tales como ácido sulfúrico y ácido fosfórico.

- 5 Ejemplos posibles de dichas sales de metales alcalinos de ácidos minerales son  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , prefiriéndose especialmente  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ . A modo de ventaja, el compuesto de tetraalquilamonio se selecciona de entre compuestos de hidróxido de tetraalquilamonio, preferentemente hidróxido de tetrametilamonio, hidróxido de tetraetilamonio y combinaciones de los mismos. Otros compuestos aptos comprenden colina, hidróxido de tetraetilamonio (TEAOH), hidróxido de tetrametilamonio (TMAOH), hidróxido de tetrabutilamonio, sales de ácidos carboxílicos tales como acetato de calcio o de sodio, hidróxidos de metales alcalinos, tales como hidróxido de sodio o de calcio, o sodio residual del FDCA.
- 10 Las cantidades de los compuestos básicos o de amonio se pueden seleccionar de entre una amplia gama. Convenientemente, las gamas son similares a las que se utilizan en la preparación de PET. Dichas cantidades aptas están comprendidas entre 0,01 y 1 mmol por mol de furandicarboxilato, preferentemente entre 0,02 y 0,5 mmol/mol y más preferentemente entre 0,03 y 0,30 mmol por mol de furandicarboxilato. Unos niveles más elevados de dichos compuestos pueden provocar la decoloración durante la polimerización.
- 15 El procedimiento de la presente invención utiliza preferentemente una mezcla inicial que comprende ácido 2,5-furandicarboxílico y etilenglicol. Se ha descubierto que dicha mezcla inicial, en particular cuando la relación molar entre el ácido furandicarboxílico y el etilenglicol está comprendida entre 1:1,01 y 1,15, permite una formación más rápida del poliéster. Además, la utilización de dichas relaciones molares con únicamente un exceso muy bajo de etilenglicol puede originar niveles más bajos de dietilenglicol, en comparación con los poliésteres que se han preparado con unos excesos superiores a los habituales, tales como las relaciones molares entre el ácido furandicarboxílico y el etilenglicol comprendidas entre 1:1,5 a 1:3, por ejemplo 1:2. Por lo tanto, los compuestos de poliéster según la presente invención se han obtenido preferentemente a partir de la polimerización del ácido furandicarboxílico y etilenglicol.
- 20 Si el poliéster va a someterse a una polimerización en estado sólido, el poliéster presenta preferentemente un contenido relativo en grupos terminales ácido carboxílico, expresado como la fracción de la cantidad molar de grupos terminales ácido carboxílico dividida por la suma de cantidades molares de grupos terminales hidroxilo y grupos terminales ácido carboxílico, comprendido entre 0,10 y 0,7. Se ha descubierto que cuando las partículas sólidas del poliéster que presentan dicho contenido en grupos terminales ácido carboxílico, se someten a una polimerización en estado sólido, la duración de la polimerización en estado sólido se puede reducir considerablemente. Si el poliéster ya se ha sometido a una polimerización en estado sólido, se puede preferir un contenido inferior de grupos terminales carboxílicos. Puede resultar conveniente un nivel absoluto comprendido entre 5 y 30 meq/kg.
- 25 En general, existen diversos procedimientos para determinar los grupos terminales de los poliésteres. Dichos métodos comprenden procedimientos de valoración, infrarrojos y resonancia magnética nuclear (NMR). A menudo se utilizan procedimientos independientes para cuantificar los cuatro grupos terminales principales: grupos terminales ácido carboxílico, grupos terminales hidroxilo, grupos terminales de éster alquílico, tales como los grupos terminales de éster metílico (para los poliésteres del éster dialquílico de un ácido dicarboxílico) y los grupos terminales que se obtienen tras la descarboxilación. A. T. Jackson y D. F. Robertson describen un procedimiento de  $^1\text{H-NMR}$  para la determinación de grupos terminales en "Molecular Characterization and Analysis of Polymers" (J. M. Chalmers y R. J. Meier (ed.), vol. 53 de "Comprehensive Analytical Chemistry", por B. Barcelo (ed.), (2008) Elsevier, en las páginas 171-203. En este procedimiento, se determina el grupo hidroxilo terminal en tereftalato de polietileno (PET) utilizando una selección de disolventes agresivos tales como 3-clorofenol, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol, ácido tricloroacético o ácido trifluoroacético. Se prefiere utilizar 1,1,2,2-tetracloroetano deuterizado (TCE-d<sub>2</sub>) como disolvente sin derivatización alguna del poliéster. Se puede aplicar un procedimiento similar en los poliésteres que comprende grupos furandicarboxilato y grupos etilenglicol. La medición de los grupos terminales para estos últimos poliésteres se puede realizar a temperatura ambiente sin riesgo indebido alguno de precipitación del poliéster de la disolución. Dicho procedimiento de  $^1\text{H-RMN}$  que utiliza TCE-d<sub>2</sub> es muy conveniente para determinar los grupos terminales hidroxilo (HEG), la descarboxilación y el contenido en grupos dietilenglicol (DEG). Las asignaciones máximas se establecen utilizando el pico TCE en un desplazamiento químico de 6,04 ppm. Se integra el pico de furano en un desplazamiento químico de 7,28 ppm y la integral se establece en 2.000 para los dos protones del anillo de furano. Los HEG se determinan a partir de los dos protones de metileno del grupo del extremo hidroxilo a 4,0 ppm. El contenido en DEG se determina a partir de la integral de los cambios en 3,82 a 3,92 ppm, que representan cuatro protones. Los grupos terminales descarboxilados se encuentran en un desplazamiento comprendido entre 7,64 y 7,67 ppm, lo que representa un protón. Cuando el poliéster comprende también grupos terminales éster metílico, la señal de metilo se producirá a 3,97 ppm, lo que representa 3 protones.
- 35 En general, existen diversos procedimientos para determinar los grupos terminales de los poliésteres. Dichos métodos comprenden procedimientos de valoración, infrarrojos y resonancia magnética nuclear (NMR). A menudo se utilizan procedimientos independientes para cuantificar los cuatro grupos terminales principales: grupos terminales ácido carboxílico, grupos terminales hidroxilo, grupos terminales de éster alquílico, tales como los grupos terminales de éster metílico (para los poliésteres del éster dialquílico de un ácido dicarboxílico) y los grupos terminales que se obtienen tras la descarboxilación. A. T. Jackson y D. F. Robertson describen un procedimiento de  $^1\text{H-NMR}$  para la determinación de grupos terminales en "Molecular Characterization and Analysis of Polymers" (J. M. Chalmers y R. J. Meier (ed.), vol. 53 de "Comprehensive Analytical Chemistry", por B. Barcelo (ed.), (2008) Elsevier, en las páginas 171-203. En este procedimiento, se determina el grupo hidroxilo terminal en tereftalato de polietileno (PET) utilizando una selección de disolventes agresivos tales como 3-clorofenol, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol, ácido tricloroacético o ácido trifluoroacético. Se prefiere utilizar 1,1,2,2-tetracloroetano deuterizado (TCE-d<sub>2</sub>) como disolvente sin derivatización alguna del poliéster. Se puede aplicar un procedimiento similar en los poliésteres que comprende grupos furandicarboxilato y grupos etilenglicol. La medición de los grupos terminales para estos últimos poliésteres se puede realizar a temperatura ambiente sin riesgo indebido alguno de precipitación del poliéster de la disolución. Dicho procedimiento de  $^1\text{H-RMN}$  que utiliza TCE-d<sub>2</sub> es muy conveniente para determinar los grupos terminales hidroxilo (HEG), la descarboxilación y el contenido en grupos dietilenglicol (DEG). Las asignaciones máximas se establecen utilizando el pico TCE en un desplazamiento químico de 6,04 ppm. Se integra el pico de furano en un desplazamiento químico de 7,28 ppm y la integral se establece en 2.000 para los dos protones del anillo de furano. Los HEG se determinan a partir de los dos protones de metileno del grupo del extremo hidroxilo a 4,0 ppm. El contenido en DEG se determina a partir de la integral de los cambios en 3,82 a 3,92 ppm, que representan cuatro protones. Los grupos terminales descarboxilados se encuentran en un desplazamiento comprendido entre 7,64 y 7,67 ppm, lo que representa un protón. Cuando el poliéster comprende también grupos terminales éster metílico, la señal de metilo se producirá a 3,97 ppm, lo que representa 3 protones.
- 40 En general, existen diversos procedimientos para determinar los grupos terminales de los poliésteres. Dichos métodos comprenden procedimientos de valoración, infrarrojos y resonancia magnética nuclear (NMR). A menudo se utilizan procedimientos independientes para cuantificar los cuatro grupos terminales principales: grupos terminales ácido carboxílico, grupos terminales hidroxilo, grupos terminales de éster alquílico, tales como los grupos terminales de éster metílico (para los poliésteres del éster dialquílico de un ácido dicarboxílico) y los grupos terminales que se obtienen tras la descarboxilación. A. T. Jackson y D. F. Robertson describen un procedimiento de  $^1\text{H-NMR}$  para la determinación de grupos terminales en "Molecular Characterization and Analysis of Polymers" (J. M. Chalmers y R. J. Meier (ed.), vol. 53 de "Comprehensive Analytical Chemistry", por B. Barcelo (ed.), (2008) Elsevier, en las páginas 171-203. En este procedimiento, se determina el grupo hidroxilo terminal en tereftalato de polietileno (PET) utilizando una selección de disolventes agresivos tales como 3-clorofenol, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol, ácido tricloroacético o ácido trifluoroacético. Se prefiere utilizar 1,1,2,2-tetracloroetano deuterizado (TCE-d<sub>2</sub>) como disolvente sin derivatización alguna del poliéster. Se puede aplicar un procedimiento similar en los poliésteres que comprende grupos furandicarboxilato y grupos etilenglicol. La medición de los grupos terminales para estos últimos poliésteres se puede realizar a temperatura ambiente sin riesgo indebido alguno de precipitación del poliéster de la disolución. Dicho procedimiento de  $^1\text{H-RMN}$  que utiliza TCE-d<sub>2</sub> es muy conveniente para determinar los grupos terminales hidroxilo (HEG), la descarboxilación y el contenido en grupos dietilenglicol (DEG). Las asignaciones máximas se establecen utilizando el pico TCE en un desplazamiento químico de 6,04 ppm. Se integra el pico de furano en un desplazamiento químico de 7,28 ppm y la integral se establece en 2.000 para los dos protones del anillo de furano. Los HEG se determinan a partir de los dos protones de metileno del grupo del extremo hidroxilo a 4,0 ppm. El contenido en DEG se determina a partir de la integral de los cambios en 3,82 a 3,92 ppm, que representan cuatro protones. Los grupos terminales descarboxilados se encuentran en un desplazamiento comprendido entre 7,64 y 7,67 ppm, lo que representa un protón. Cuando el poliéster comprende también grupos terminales éster metílico, la señal de metilo se producirá a 3,97 ppm, lo que representa 3 protones.
- 45 En general, existen diversos procedimientos para determinar los grupos terminales de los poliésteres. Dichos métodos comprenden procedimientos de valoración, infrarrojos y resonancia magnética nuclear (NMR). A menudo se utilizan procedimientos independientes para cuantificar los cuatro grupos terminales principales: grupos terminales ácido carboxílico, grupos terminales hidroxilo, grupos terminales de éster alquílico, tales como los grupos terminales de éster metílico (para los poliésteres del éster dialquílico de un ácido dicarboxílico) y los grupos terminales que se obtienen tras la descarboxilación. A. T. Jackson y D. F. Robertson describen un procedimiento de  $^1\text{H-NMR}$  para la determinación de grupos terminales en "Molecular Characterization and Analysis of Polymers" (J. M. Chalmers y R. J. Meier (ed.), vol. 53 de "Comprehensive Analytical Chemistry", por B. Barcelo (ed.), (2008) Elsevier, en las páginas 171-203. En este procedimiento, se determina el grupo hidroxilo terminal en tereftalato de polietileno (PET) utilizando una selección de disolventes agresivos tales como 3-clorofenol, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol, ácido tricloroacético o ácido trifluoroacético. Se prefiere utilizar 1,1,2,2-tetracloroetano deuterizado (TCE-d<sub>2</sub>) como disolvente sin derivatización alguna del poliéster. Se puede aplicar un procedimiento similar en los poliésteres que comprende grupos furandicarboxilato y grupos etilenglicol. La medición de los grupos terminales para estos últimos poliésteres se puede realizar a temperatura ambiente sin riesgo indebido alguno de precipitación del poliéster de la disolución. Dicho procedimiento de  $^1\text{H-RMN}$  que utiliza TCE-d<sub>2</sub> es muy conveniente para determinar los grupos terminales hidroxilo (HEG), la descarboxilación y el contenido en grupos dietilenglicol (DEG). Las asignaciones máximas se establecen utilizando el pico TCE en un desplazamiento químico de 6,04 ppm. Se integra el pico de furano en un desplazamiento químico de 7,28 ppm y la integral se establece en 2.000 para los dos protones del anillo de furano. Los HEG se determinan a partir de los dos protones de metileno del grupo del extremo hidroxilo a 4,0 ppm. El contenido en DEG se determina a partir de la integral de los cambios en 3,82 a 3,92 ppm, que representan cuatro protones. Los grupos terminales descarboxilados se encuentran en un desplazamiento comprendido entre 7,64 y 7,67 ppm, lo que representa un protón. Cuando el poliéster comprende también grupos terminales éster metílico, la señal de metilo se producirá a 3,97 ppm, lo que representa 3 protones.
- 50 En general, existen diversos procedimientos para determinar los grupos terminales de los poliésteres. Dichos métodos comprenden procedimientos de valoración, infrarrojos y resonancia magnética nuclear (NMR). A menudo se utilizan procedimientos independientes para cuantificar los cuatro grupos terminales principales: grupos terminales ácido carboxílico, grupos terminales hidroxilo, grupos terminales de éster alquílico, tales como los grupos terminales de éster metílico (para los poliésteres del éster dialquílico de un ácido dicarboxílico) y los grupos terminales que se obtienen tras la descarboxilación. A. T. Jackson y D. F. Robertson describen un procedimiento de  $^1\text{H-NMR}$  para la determinación de grupos terminales en "Molecular Characterization and Analysis of Polymers" (J. M. Chalmers y R. J. Meier (ed.), vol. 53 de "Comprehensive Analytical Chemistry", por B. Barcelo (ed.), (2008) Elsevier, en las páginas 171-203. En este procedimiento, se determina el grupo hidroxilo terminal en tereftalato de polietileno (PET) utilizando una selección de disolventes agresivos tales como 3-clorofenol, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol, ácido tricloroacético o ácido trifluoroacético. Se prefiere utilizar 1,1,2,2-tetracloroetano deuterizado (TCE-d<sub>2</sub>) como disolvente sin derivatización alguna del poliéster. Se puede aplicar un procedimiento similar en los poliésteres que comprende grupos furandicarboxilato y grupos etilenglicol. La medición de los grupos terminales para estos últimos poliésteres se puede realizar a temperatura ambiente sin riesgo indebido alguno de precipitación del poliéster de la disolución. Dicho procedimiento de  $^1\text{H-RMN}$  que utiliza TCE-d<sub>2</sub> es muy conveniente para determinar los grupos terminales hidroxilo (HEG), la descarboxilación y el contenido en grupos dietilenglicol (DEG). Las asignaciones máximas se establecen utilizando el pico TCE en un desplazamiento químico de 6,04 ppm. Se integra el pico de furano en un desplazamiento químico de 7,28 ppm y la integral se establece en 2.000 para los dos protones del anillo de furano. Los HEG se determinan a partir de los dos protones de metileno del grupo del extremo hidroxilo a 4,0 ppm. El contenido en DEG se determina a partir de la integral de los cambios en 3,82 a 3,92 ppm, que representan cuatro protones. Los grupos terminales descarboxilados se encuentran en un desplazamiento comprendido entre 7,64 y 7,67 ppm, lo que representa un protón. Cuando el poliéster comprende también grupos terminales éster metílico, la señal de metilo se producirá a 3,97 ppm, lo que representa 3 protones.
- 55 En general, existen diversos procedimientos para determinar los grupos terminales de los poliésteres. Dichos métodos comprenden procedimientos de valoración, infrarrojos y resonancia magnética nuclear (NMR). A menudo se utilizan procedimientos independientes para cuantificar los cuatro grupos terminales principales: grupos terminales ácido carboxílico, grupos terminales hidroxilo, grupos terminales de éster alquílico, tales como los grupos terminales de éster metílico (para los poliésteres del éster dialquílico de un ácido dicarboxílico) y los grupos terminales que se obtienen tras la descarboxilación. A. T. Jackson y D. F. Robertson describen un procedimiento de  $^1\text{H-NMR}$  para la determinación de grupos terminales en "Molecular Characterization and Analysis of Polymers" (J. M. Chalmers y R. J. Meier (ed.), vol. 53 de "Comprehensive Analytical Chemistry", por B. Barcelo (ed.), (2008) Elsevier, en las páginas 171-203. En este procedimiento, se determina el grupo hidroxilo terminal en tereftalato de polietileno (PET) utilizando una selección de disolventes agresivos tales como 3-clorofenol, 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-propanol, ácido tricloroacético o ácido trifluoroacético. Se prefiere utilizar 1,1,2,2-tetracloroetano deuterizado (TCE-d<sub>2</sub>) como disolvente sin derivatización alguna del poliéster. Se puede aplicar un procedimiento similar en los poliésteres que comprende grupos furandicarboxilato y grupos etilenglicol. La medición de los grupos terminales para estos últimos poliésteres se puede realizar a temperatura ambiente sin riesgo indebido alguno de precipitación del poliéster de la disolución. Dicho procedimiento de  $^1\text{H-RMN}$  que utiliza TCE-d<sub>2</sub> es muy conveniente para determinar los grupos terminales hidroxilo (HEG), la descarboxilación y el contenido en grupos dietilenglicol (DEG). Las asignaciones máximas se establecen utilizando el pico TCE en un desplazamiento químico de 6,04 ppm. Se integra el pico de furano en un desplazamiento químico de 7,28 ppm y la integral se establece en 2.000 para los dos protones del anillo de furano. Los HEG se determinan a partir de los dos protones de metileno del grupo del extremo hidroxilo a 4,0 ppm. El contenido en DEG se determina a partir de la integral de los cambios en 3,82 a 3,92 ppm, que representan cuatro protones. Los grupos terminales descarboxilados se encuentran en un desplazamiento comprendido entre 7,64 y 7,67 ppm, lo que representa un protón. Cuando el poliéster comprende también grupos terminales éster metílico, la señal de metilo se producirá a 3,97 ppm, lo que representa 3 protones.
- 60 Los grupos terminales ácido carboxílico se determinan utilizando el procedimiento de valoración según ASTM D7409, adaptado para el poli(2,5-furandicarboxilato de etileno). Un procedimiento modificado de este modo implica la valoración de una disolución al 4% en p/p de poli(2,5-furandicarboxilato de etileno) en ortocresol con KOH 0,01 M en etanol como reactivo de valoración hasta su punto de equivalencia, utilizando 0,5 mg de verde de

bromocresol (2,6-dibromo-4-[7-(3,5-dibromo-4-hidroxi-2-metilfenil)-9,9-dioxo-8-oxa-9λ6-tiabiciclo[4.3.0]nona-1,3,5-trien-7-il]-3-metilfenol) en 0,1 ml de etanol como indicador.

5 Para el propósito de la presente solicitud, los valores de los HEG y los grupos terminales descarboxilados se obtienen mediante <sup>1</sup>H-NMR utilizando TCE-d<sub>2</sub>, mientras que los valores de los CEG se determinan mediante el procedimiento de valoración descrito anteriormente.

10 El peso molecular del poliéster según la presente invención se expresa convenientemente como la viscosidad intrínseca. Se puede aumentar dicho peso molecular de dichos poliésteres sometiendo el poliéster según la presente invención a polimerización en estado sólido. Sin embargo, se puede utilizar el poliéster según la presente invención que presenta un peso molecular relativamente bajo, por ejemplo, de por lo menos 0,45 dl/g, con diversos objetivos. Dichos objetivos comprenden la producción de fibras, entre ellas las producidas en los procedimientos de hilado/trefilado de fusión y las producidas en procesos de soplado por fusión, la producción de películas o láminas para envases y similares, la producción de artículos moldeados por inyección, la producción de botellas o la producción de las cintas destinadas a la disposición de flejes. El peso molecular del presente poliéster es superior al éster del diol y el FDCA con uno o dos grupos furandicarboxilato. El peso molecular se expresa con respecto a la viscosidad intrínseca. En primer lugar, se determina la viscosidad relativa ( $\eta_{rel}$ ) en una mezcla de 60/40% en peso/peso de fenol y tetracloroetano a 30 °C y una concentración (c) de 0,4 g/dl. Dicho procedimiento es similar a la normativa ASTM D4603 para la determinación de la viscosidad propia del poli(tereftalato de etileno). La viscosidad intrínseca se calcula utilizando la ecuación de Billmyer:

$$\text{Viscosidad intrínseca (VI)} = \{\eta_{rel} - 1 + 3 \cdot \ln(\eta_{rel})\} / (4 \cdot c)$$

25 La viscosidad intrínseca es convenientemente superior a 0,45 dl/g y más preferentemente se encuentra comprendida entre 0,45 y 1,0 dl/g. Si se ha sometido la composición a una etapa adicional en estado sólido, el peso molecular, como viscosidad intrínseca, está comprendido preferentemente entre 0,65 y 1,2 dl/g, preferentemente hasta por lo menos 0,75 dl/g, y más preferentemente comprendido entre 0,75 dl/g y 1,0 dl/g. Cuando el compuesto se va a utilizar sin una etapa adicional en estado sólido, el peso molecular se encuentra preferentemente en el intervalo preferido para la aplicación de uso final pretendida, por ejemplo, comprendido entre 0,65 y 1,0 dl/g, que es un peso molecular apto para la aplicación de uso final en botellas.

35 El contenido de los diversos grupos terminales se puede expresar con respecto a otros grupos terminales. Tal como se indicó anteriormente, el contenido relativo de grupos terminales ácido carboxílico se encuentra convenientemente comprendido entre 0,10 y 0,7 con respecto a la suma de los grupos terminales hidroxilo y ácido carboxílico. Más convenientemente, el contenido relativo de grupos terminales ácido carboxílico se encuentra comprendido entre 0,14 y 0,65 basándose en la suma de los grupos terminales hidroxilo y ácido carboxílico. También es posible expresar la cantidad de grupos terminales como el valor absoluto por unidad de peso de poliéster. Expresada como valor absoluto, la cantidad de grupos terminales ácido carboxílico se encuentra comprendida convenientemente entre 15 y 122 meq/kg, antes de cualquier etapa en estado sólido. La cantidad absoluta de grupos terminales ácido carboxílico (CEG) se obtiene directamente a partir de la valoración. Las determinaciones de las cantidades de grupos terminales hidroxilo (HEG), grupos terminales descarboxilados (DecarbEG) y grupos dietilenglicol (DEG) se realizan del siguiente modo.

45 Se pesan aproximadamente 10 mg de poliéster y se disponen en un frasco de vidrio de 8 ml. Se añaden al frasco 0,7 ml de TCE-d<sub>2</sub> y se disuelve el poliéster a temperatura ambiente mientras se agita la mezcla en el frasco. La mezcla disuelta se somete a <sup>1</sup>H-NMR, mientras que el pico para TCE-d<sub>2</sub> se ajusta a 6,04 ppm. El pico de furano se centra en 7,28 ppm y se integra, y la integral se ajusta en 2.000, para representar los 2 protones en el anillo furano. Se integran las señales de <sup>1</sup>H-NMR y se calculan las cantidades de los grupos finales del siguiente modo:

50 Grupos terminales hidroxilo (HEG), meq/kg = 5494 \* integral en 4,0 ppm/2;  
Grupos terminales descaboxilados (DecarbEG) meq/kg = 5494 \* integral en 7,65 ppm.

55 Cuando el poliéster también comprende grupos terminales éster metílico, la señal de metilo se producirá en 3,97 ppm y se calcula el contenido de los grupos terminales éster como:

Grupos terminales éster (EEG) meq/kg = 5494 \* integral en 3,97 ppm/3.

60 Se puede determinar el contenido de DEG, con respecto al furandicarboxilato, a partir de la integral a 3,82-3,92 ppm, dividido por 2.

Aunque que muchos poliésteres de la técnica anterior que comprenden grupos furandicarboxilato presentan un color gris, marrón o amarillo, los poliésteres según la presente invención presentan poco color. El color se expresa con respecto a la absorbancia. Los poliésteres son convenientemente claros y presentan una absorbancia de la luz de como máximo 0,08, preferentemente como máximo 0,05, determinada como una

disolución de 30 mg/ml en una mezcla de diclorometano:hexafluoroisopropanol con una proporción de 8:2 (vol/vol) a 400 nm.

5 Los poliésteres según la presente invención presentan, convenientemente un peso molecular expresado como viscosidad intrínseca de por lo menos 0,45 dl/g. La viscosidad intrínseca es una medida muy relacionada con el peso molecular medio ponderado Mw. El peso molecular medio ponderado y el número que expresa el peso molecular medio también se pueden determinar utilizando cromatografía de exclusión por tamaños (GPC). Las mediciones de GPC se realizan convenientemente a 25 °C. Para el cálculo se utilizan modelos de poliestireno. Convenientemente se puede utilizar como eluyente una mezcla de disolventes de cloroformo:2-clorofenol en una proporción 6:4 (vol/vol). En la parte experimental, se realizaron las mediciones de GPC en dichas condiciones en un sistema de HPLC Merck-Hitachi LaChrom equipado con dos columnas PLgel de 5 µm MIXED-C (300 x 7,5 mm). El cálculo del peso molecular se realizó con el software Cirrus™ PL DataStream. Cuando el peso molecular medio ponderado Mw y el número que expresa el peso molecular medio Mn se determinan también para el poliéster según la presente invención, el índice de polidispersidad (Mw/Mn) se encuentra comprendido convenientemente entre 1,9 y 2,6.

20 El poliéster según la presente invención puede ser amorfo. Dicho producto amorfo normalmente se obtiene directamente de la policondensación. Sin embargo, el poliéster según la presente invención es preferentemente semicristalino. La cristalinidad de un polímero tiende a influir en sus propiedades físicas, tales como su densidad y su temperatura de fusión. Se puede determinar la cristalinidad del polímero mediante calorimetría por análisis diferencial (DSC) cuantificando el calor asociado a la fusión del polímero. La cristalinidad se expresa a menudo como la entalpía neta de fusión en relación con el número de Joules por gramo, cuyo número se obtiene mediante la técnica de DSC. El poliéster según la presente invención presenta preferentemente una cristalinidad de por lo menos 25 J/g, medida por DSC. Una entalpía máxima en relación con el número de Joules por gramo es normalmente de 80 J/g. El poliéster según la presente invención presenta un cierto grado de cristalinidad y también presenta una temperatura de fusión determinada. La temperatura de fusión de un polímero se determina fácilmente mediante DSC y se mide en la parte superior del pico endotérmico. La norma ISO 11357-3 describe dicha determinación de una temperatura de fusión. Según dicha determinación, el poliéster según la presente invención presenta convenientemente una temperatura de fusión de por lo menos 215 °C. En un poliéster muy cristalino, la temperatura de fusión puede superar los 230 °C e incluso alcanzar los 245 °C.

35 Es habitual que los compuestos que comprenden el poliéster contengan algo de humedad, especialmente porque es normal que haya algo de humedad cuando el polímero se expone al aire atmosférico. Puesto que la estabilidad del compuesto que comprende el poliéster según la presente invención mejora cuando el compuesto que comprende el poliéster contiene la menor humedad posible, el compuesto que comprende el poliéster según la presente invención presenta preferentemente un contenido en humedad de 100 ppmw en peso como máximo, más preferentemente como máximo 50 ppmw, determinadas según la norma ISO 15512.

40 Cuando el poliéster según la presente invención presenta un contenido en grupos terminales carboxílicos comprendido entre 0,10 y 0,70 y se somete a polimerización en estado sólido, la velocidad de polimerización durante la polimerización en estado sólido depende menos del tamaño de las partículas de poliéster que de los poliésteres con un contenido inferior de grupos terminales ácido carboxílico. Al ser este el caso, los expertos en la materia pueden seleccionar el tamaño de partícula más factible del poliéster para someterlo a una polimerización en estado sólido. Convenientemente, el tamaño de partícula se selecciona de tal modo que existan entre 40 y 350 partículas por gramo. Normalmente, dicho tamaño de partícula se reduce a partículas de poliéster con una masa comprendida entre 2,8 y 25 mg. Dichas partículas se pueden preparar fácilmente y proporcionar todavía una buena velocidad de polimerización cuando se someten a polimerización en estado sólido. Dichos tamaños de partícula son también susceptibles de procesarse mediante esquemas de transporte de aire y se procesan convenientemente en secadores, tolvas y tornillos de extrusión existentes. Las partículas que resultan demasiado pequeñas pueden provocar un aumento de riesgos debido al polvo y las dificultades de procesamiento como consecuencia de una mayor tendencia a pegarse o "colgarse" en diversas superficies.

55 Se ha descubierto asimismo que dicho poliéster se puede preparar apartándose de los procedimientos de la técnica anterior destinados a realizar poliésteres similares. En líneas generales, muchos documentos de la técnica anterior relacionados con los poliésteres basados en el ácido furandicarboxílico han recomendado partir de un diéster del diácido como material inicial preferido. Por ejemplo, se ha descrito la utilización de furandicarboxilato de dimetilo. Sin embargo, se puede realizar el poliéster según la presente invención a partir de dicho material inicial. Sin embargo, en tal caso el contenido de grupos terminales ácido carboxílico generalmente será demasiado bajo en dicha preparación. Si se pretende utilizar dicho producto, es posible añadir agua a la mezcla de diéster y etilenglicol. Un modo de conseguirlo puede comprender la utilización de etilenglicol húmedo. El agua añadida puede causar la saponificación de algunos de los diésteres, produciéndose grupos ácido carboxílico. Otra posibilidad es utilizar una mezcla de FDCA y el diéster del mismo. Dicha mezcla se puede obtener asimismo añadiendo el diácido de FDCA durante la transesterificación del diéster de FDCA con etilenglicol para producir el diéster de etileno de FDCA. En particular, la adición de FDCA durante la etapa de

transesterificación, más en particular hacia el final de dicha etapa, permite añadir grupos terminales ácidos al poliéster resultante. De este modo, se obtienen diversos grupos terminales carboxílicos en concordancia con el poliéster según la forma de realización preferida de la presente invención. Resulta asimismo posible utilizar una mezcla de agua y etilenglicol cuando se inicia con FDCA. Esto puede resultar útil, por ejemplo, para mejorar la mezcla inicial de FDCA a fin de formar una suspensión, sin aumentar el contenido de etilenglicol más allá del intervalo pretendido y, de este modo, alcanzar un cierto número de grupos terminales carboxílicos según el poliéster preferido. También resulta posible añadir diácido de FDCA posteriormente en el período de esterificación o durante el período de congelación previa a fin de ajustar el número de grupos terminales carboxílicos de tal modo que el poliéster resultante tras la policondensación en fusión presente un cierto número de grupos extremos carboxílicos en concordancia con el poliéster según la forma de realización preferida de la presente invención.

Se ha descubierto que cuando la preparación de un furandicarboxilato de polietileno se inicia a partir del éster dimetilico del diácido, el contenido del grupo terminal ácido carboxílico del polímero resultante es inferior a aproximadamente 10 meq/kg y también inferior a 0,1 cuando se expresa como una fracción de los grupos terminales ácido carboxílico con respecto a la suma de los grupos terminales ácido carboxílico más los grupos terminales hidroxilo. Se ha descubierto también que, aunque la técnica anterior recomienda un exceso significativo de diol con respecto al ácido furandicarboxílico, se obtienen unos poliésteres aptos si el exceso de diol es bastante pequeño. Asimismo, el exceso reducido de etilenglicol tiene como efecto beneficioso que una cantidad reducida de etilenglicol es susceptible a la formación de dietilenglicol.

El policondensado obtenido a partir de la polimerización a partir de una mezcla inicial en la que la relación molar entre el ácido 2,5-furandicarboxílico y el etilenglicol se encuentra comprendida entre 1:1,01 y 1:1,15, comprende un contenido superior en grupos terminales ácido carboxílico que en policondensados que se han preparado a partir de mezclas iniciales que comprendían un exceso superior de etilenglicol.

Se conoce en la técnica la reacción de esterificación entre el ácido furandicarboxílico y el etilenglicol. Por lo tanto, los expertos en la materia podrán apreciar que, aunque no resulta necesario utilizar un catalizador de esterificación, se puede contemplar el uso de dicho catalizador. Por lo tanto, en una forma de realización, se hacen reaccionar convenientemente el ácido 2,5-furandicarboxílico y el etilenglicol en presencia de un catalizador de esterificación. Puesto que los catalizadores de esterificación son convenientemente ácidos y puesto que uno de los reactivos es un ácido, falta la necesidad de utilizar un catalizador de esterificación. Sin embargo, cuando se utiliza dicho catalizador, es convenientemente un ácido de Brønsted o de Lewis. Los ácidos de Brønsted pueden ser ácidos minerales fuertes tales como el ácido sulfúrico, el ácido nítrico o el ácido clorhídrico. Los ácidos de Lewis apto comprenden compuestos de metales tales como cloruros, bromuros, tosilatos, alcóxidos y triflatos de metales seleccionados de entre el grupo que comprende titanio, cinc, estaño, calcio y mezclas de los mismos. También resulta posible utilizar ésteres orgánicos de ácidos metálicos, tales como ésteres alquílicos de ácido titánico, ácido estánico y similares. Por lo tanto, se selecciona preferentemente el catalizador de esterificación entre catalizadores que comprenden uno o más metales seleccionados de entre el grupo que comprende titanio, estaño, calcio y antimonio. Los catalizadores, si se utilizan, se pueden agregar desde el inicio de la reacción de esterificación. Sin embargo, puesto que la esterificación se produce fácilmente sin necesidad de un catalizador de esterificación, se realiza la esterificación preferentemente sin un catalizador de esterificación, que se dedica a la reacción de esterificación.

En la reacción de esterificación se va formando agua. Se ha descubierto que resulta ventajoso eliminar el agua formada durante la reacción entre el ácido 2,5-furandicarboxílico y el etilenglicol. Por lo tanto, la reacción de esterificación es una reacción de equilibrio y se puede realizar. La eliminación del agua de la mezcla de esterificación se puede realizar de cualquier modo conocido. Es apto para pasar cualquier agua formada en una fase gaseosa a través de un condensador y eliminar el condensado que comprende el agua licuada. La fase gaseosa puede comprender asimismo una cierta cantidad de etilenglicol. Por lo tanto, se pasa convenientemente la fase gaseosa a través de un sistema de destilación en el que se separan el agua y el etilenglicol. El etilenglicol se recicla debidamente, por lo menos parcialmente, pero sustancialmente se prefiere completamente, a la mezcla de esterificación. Se evacúa de este modo el agua separada. Por lo tanto, el procedimiento según la presente invención se realiza preferentemente de tal modo que el agua se elimina en un sistema de destilación en el que la mayor parte del etilenglicol que se elimina con el agua se separa del agua y se recicla por lo menos parcialmente.

Resultará evidente que el grado con el que el etilenglicol se arrastra en la fase gaseosa del agua formada depende de la temperatura y de otras condiciones en las que se realiza la esterificación. Las condiciones que se utilizan en la técnica anterior comprenden una temperatura comprendida aproximadamente entre 180 y 280 °C y aproximadamente a presión ambiente. Estas condiciones se mantienen durante un período de aproximadamente 4 horas. En el procedimiento según la presente invención, la reacción de esterificación entre el ácido 2,5-furandicarboxílico y el etilenglicol se realiza preferentemente a una temperatura comprendida entre 160 y 240 °C. La presión se encuentra comprendida convenientemente entre 0,9 y 5 bar, y la reacción se continúa

ventajosamente durante un período comprendido entre 0,5 y 4 h. La reacción se realiza convenientemente en una atmósfera inerte, por ejemplo, en nitrógeno, neón, helio o argón. La mezcla inicial puede comprender un diluyente, tal como agua, que se elimina convenientemente durante la reacción.

5 La reacción de transesterificación también es muy conocida. En este sentido se hace referencia a los documentos WO 2010/077133 y WO 2013/120989. Cuando se realiza la esterificación en un procedimiento discontinuo, resulta posible controlar el progreso de la reacción determinando la cantidad de agua que se produce y comparándola con la cantidad de agua teórica determinada estequiométricamente al 100% de esterificación. Cuando se ha eliminado por lo menos el 70% de la cantidad teórica de agua, se detiene la esterificación y se reduce la presión para iniciar una etapa de policondensación. Durante la reducción de la presión, se elimina el etilenglicol no reaccionado por evaporación de la mezcla de la reacción. El instante exacto del final de la esterificación se determina mediante ensayos y depende de la velocidad posterior de la reducción de la presión y de la eficiencia en la eliminación de agua, pero normalmente en los procesos por lotes el grado de eliminación del agua es convenientemente de por lo menos un 70% y puede llegar a alcanzar un 100%. Preferentemente, el alcance de la eliminación del agua se encuentra comprendido entre un 70 y un 96%. Preferentemente, la etapa de esterificación no debe continuar más allá del punto del 96% o el producto resultante puede carecer de grupos terminales ácido carboxílico. Si se continúa la etapa de esterificación durante un período demasiado breve antes de que la eliminación de etilenglicol haya alcanzado el límite inferior, el producto generalmente presentará demasiados grupos terminales ácido carboxílico. Si la esterificación alcanza menos del 70%, es decir, si se ha eliminado menos del 70% de la cantidad teórica de agua, por ejemplo, un 40%, se puede volatilizar tanto etilenglicol de la mezcla durante la reducción de presión que el compuesto de éster resultante presentará un número elevado de grupos terminales carboxílicos.

25 Cuando se realiza el procedimiento de un modo continuo, se controlará el progreso de la reacción de esterificación utilizando la temperatura, la relación de alimentación del etilenglicol y el tiempo de permanencia medio. La cantidad de agua que se elimina del sistema volverá a dar una indicación del alcance de la reacción de esterificación. Asimismo, en procedimientos continuos, se controla la cantidad de agua eliminada y se prolonga la reacción de esterificación hasta que se ha eliminado por lo menos el 70% de la cantidad estequiométrica de agua, basándose en el 100% de la esterificación de la alimentación de FDCA que se ha eliminado. Los reactores, equipos y controles necesarios para la producción de poli(tereftalato de etileno) tal como se describe en el libro *Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters* de J. Scheirs y T. E. Long (ed.), Wiley, 2003, se pueden utilizar convenientemente en la producción de los poliésteres de poli(2,5-furandicarboxilato de etileno) según la presente invención.

35 Al reducir la presión se elimina el exceso de etilenglicol. En un procedimiento por lotes se reduce la presión. En la práctica, la reducción de la presión puede resultar lenta. El proceso de la reducción de la presión puede tardar entre 0,1 y 1,8 horas. Resulta favorable reducir lentamente la presión a fin de evitar el arrastre de los ésteres con un peso molecular relativamente bajo en el sistema de vacío. Por lo tanto, el compuesto de éster pasa a través de una etapa en la que la presión está comprendida entre 20 y 700 mbar. A dicha presión tiene lugar una policondensación previa. La policondensación final se produce a una presión reducida comprendida entre 0,05 y 20 mbar.

45 En el caso de un procedimiento continuo, la temperatura del compuesto de éster se eleva convenientemente en comparación con la temperatura inicial de la esterificación. Posteriormente, el compuesto de éster calentado adicional se somete a una reducción de la presión. Al reducir la presión se agota el etilenglicol del compuesto. Tras la reducción de la presión, el producto se mantiene a la presión reducida y, opcionalmente, se continúa calentando de tal modo que se realiza una etapa de policondensación previa en evaporación de más etilenglicol, obteniéndose un oligómero de furandicarboxilato de etileno. Dicha policondensación previa se puede realizar en un reactor de depósito agitado continuo o en un reactor horizontal que funcione con discos giratorios perforados. La presión en dicha reacción de policondensación previa puede estar comprendida entre 20 y 700 mbar. Para una reducción adicional de la presión, se puede pasar el producto de la policondensación previa a un reactor adicional en el que se realiza una policondensación adicional. En dichas reacciones de policondensación se pueden utilizar reactores de tipo disco o de tipo de jaula. La presión en la reacción de policondensación es apta entre 0,05 y 20, convenientemente entre 0,05 y 5 mbar.

55 Se ha descubierto que la reacción de esterificación para el ácido 2,5-furandicarboxílico es bastante rápida y, como resultado de ello, es más común "sobreesterificar" y dejar una cantidad inadecuada de grupos terminales ácido carboxílico en el compuesto que comprende el poliéster. El alcance potencial de la reacción de esterificación se puede controlar de algún modo utilizando un parámetro adimensional definido en la presente memoria como:

Potencial de esterificación ( $EsPo$ ) =  $(MR-1)^2 \cdot P_{H_2O}(T)$ , en el que MR representa la relación molar entre el etilenglicol y el ácido 2,5-furandicarboxílico, siendo MR superior a 1;

$P_{H_2O}(T)$  representa la presión de vapor del componente puro (en bar) del agua a la temperatura  $T$ , que es la temperatura de la reacción final en la mezcla de esterificación antes de que la presión se reduzca para entrar en la etapa de policondensación previa.  $P_{H_2O}$  se determina según una ecuación establecida para la presión de vapor del agua pura. La ecuación de Antoine  $\log_{10} P = A - B/(C + T)$ , en la que  $T$  es la temperatura al final de la esterificación, expresada en °C,  $A = 5,2594$ ,  $B = 1810,94$ , y  $C = 244,485$  proporciona la presión de vapor requerida del agua pura en bar. Se ha descubierto que se obtienen los mejores resultados en lo que se refiere al policondensado si el potencial de esterificación es como máximo 0,8, preferentemente comprendido entre 0,05 y 0,5.

En este punto, se somete el compuesto de éster a una etapa de policondensación previa. Para ello, se reduce la presión y, opcionalmente, se añade un catalizador de la policondensación. Se utiliza la etapa de policondensación previa para eliminar el etilenglicol en exceso o sin reaccionar, y para reducir la presión a fin de eliminar la mayor parte de los otros productos volátiles, al tiempo que se evita la formación excesiva de espuma o arrastre de impurezas en las líneas de vacío. Se aumenta la temperatura y se inicia la reacción de policondensación, con la liberación y eliminación del etilenglicol que se genera mediante la reacción. Es importante indicar que la reacción de esterificación también continúa, con lo que se genera agua que se elimina asimismo de la mezcla de la reacción. En equipos muy pequeños, se puede utilizar el mismo reactor para todas las etapas de la reacción. Cuando la reacción se realiza en equipos discontinuos a gran escala, se puede completar dicha etapa en el mismo equipo que la reacción de esterificación y, tras dicha etapa, se puede transferir la mezcla reactiva a un recipiente diseñado especialmente para una buena transferencia de masa a fin de potenciar la reacción de policondensación. Alternativamente, se puede desplazar la mezcla reactiva a un recipiente distinto antes de iniciar la bajada de presión y, a continuación, realizar la policondensación previa y la policondensación en un único recipiente. La adición del catalizador de policondensación se puede haber producido ya al principio de la reacción de esterificación, de tal modo que en este punto no se pretenden más adiciones del catalizador al producto de esterificación.

Se pueden añadir asimismo otros compuestos, por ejemplo, estabilizantes, al producto de la esterificación. Los estabilizantes pueden comprender antioxidantes. Los antioxidantes preferidos son compuestos que comprenden fosfito, compuestos de fosfato, compuestos de fosfonato y compuestos fenólicos trabados. Los antioxidantes comprenden compuestos tales como fosfitos de trialquilo, fosfitos de alquilo/arilo mixtos, fosfitos de arilo alquilados, fosfitos de arilo estéricamente trabados, fosfitos espirocíclicos alifáticos, fosfatos de alquilo, fosfatos de arilo, fosfatos de alquilo/arilo mixtos, fosfonoacetatos de alquilo, fenilespirocíclicos estéricamente trabados, bisfosfonitos estéricamente trabados, hidroxibencilos, alquilfenoles, aminas aromáticas, aminas trabadas, hidroquinonas y mezclas de los mismos. Dichos otros compuestos se pueden añadir también por lotes o en cualquier otro tipo de operación.

Por lo tanto, las mezclas que comprenden el poliéster según la presente invención pueden comprender dichos compuestos.

El poli(2,5-furandicarboxilato de etileno) es un poliéster de cristalización lenta en condiciones de reposo. Se pueden añadir nucleantes al compuesto que comprende el poliéster para aumentar la densidad de nucleación y, de este modo, aumentar la velocidad de cristalización global en condiciones de reposo.

En el caso de la cristalización del poliéster según la presente invención, normalmente antes de un proceso de SSP, se puede realizar la cristalización a partir de la masa fundida (tal como se puede realizar en un granulador subacuático con cristalización in situ) o del estado vítreo (tras enfriar los granulados del polímero). Para ello, se puede pretender añadir un nucleante al poliéster tras la policondensación, normalmente todavía en fase de fusión. Los niveles de adición característicos estarán comprendidos entre un 0,05 y un 2% en peso, o más preferentemente entre un 0,1 y un 1% en peso, basándose en el poliéster total. Los minerales inorgánicos se pueden añadir con unos niveles más elevados, por ejemplo, hasta un 5 o incluso un 10% en peso si se pretende de este modo.

Los nucleantes pueden comprender minerales inorgánicos, sales orgánicas, ceras con una temperatura de fusión elevada u otros polímeros. Los ejemplos de minerales inorgánicos comprenden talco, dióxido de titanio, sílice fundida, nitruro de boro, mica y carbonato de calcio. Algunos ejemplos de las sales orgánicas: estearato de sodio, estearato de cinc, otras sales de estearato, sales de otros ácidos grasos, sal de disodio de FDCA, sal de sodio de sacarina, sales del ácido benzoico, fosfonatos aromáticos, sales de ésteres del ácido sulfónico y del ácido isoftálico, y materiales comerciales tales como bis (4-propilbencilideno)propilsorbitol, disponible como Millad®NX88 en Milliken Chemicals y 3,4-dimetilbencilidenosorbitol, disponible como Millad®3988, sales y ésteres de fosfato, disponibles como NA-11, sal sódica de metilbis(4,6-di-t-butilfenil)fosfato, o NA-21, aluminohidroxibis[2,2"-metilbis(4,6-di-t-butilfenil)]fosfato. Las ceras con un punto de fusión elevado comprenden materiales tales como estearamidas y erucamidas o bisamidas. Los polímeros pueden comprender materiales tales como ionómeros, por ejemplo, ionómeros Surlyn de Du Pont, ionómeros Aculyne de Rohm and Haas, PEG2000 (macrogol), PET, PBT u otros. Se puede realizar la cristalización de los polímeros por diversos

5 motivos, cada uno de los cuales supondrá unas condiciones distintas. Por ejemplo, para crear una pieza semicristalina en una máquina de moldeo por inyección, sería necesario una cristalización rápida del polímero durante el enfriamiento desde la masa fundida. Por otra parte, en el caso de la cristalización del material antes del secado de los fragmentos recuperados, sería deseable que el polímero cristalizase rápidamente desde el estado vítreo o en calor ascendente.

10 En una operación más continua, se puede realizar la reacción de policondensación previa en un recipiente dedicado, normalmente recogiendo los vapores superiores por separado de los vapores generados durante la etapa de esterificación. Durante dicha etapa del proceso, se reduce la presión normalmente desde aproximadamente 1 bar o más, se utiliza durante la esterificación hasta aproximadamente entre 20 y 700 mbar, y más preferentemente aproximadamente entre 20 y 100 mbar. La duración de la policondensación previa se encuentra comprendida ventajosamente entre 0,5 y 2 horas.

15 En este punto, se somete el compuesto de éster a una etapa de policondensación. Tal como se conoce a partir de la técnica anterior, la presión en dicha etapa se reduce aún más. Se pueden aplicar presiones inferiores a aproximadamente 5 mbar y preferentemente inferiores a aproximadamente 3 mbar. Se prefieren presiones inferiores para una buena transferencia de masa y la eliminación del etilenglicol y del agua que se liberan en las reacciones de policondensación y esterificación, respectivamente. Las temperaturas de policondensación según la técnica anterior se encuentran comprendidas aproximadamente entre 180 y 280 °C. La policondensación según la presente invención se realiza preferentemente a una temperatura comprendida entre 245 y 270 °C y convenientemente a una presión comprendida entre 0,05 y 5 mbar. En dichas condiciones se garantiza que el compuesto de éster, así como el policondensado formado se encuentre en un estado fundido. La policondensación continúa convenientemente durante un período comprendido entre 1 y 3 horas. Preferentemente, el período combinado para las etapas de policondensación previa y policondensación se encuentra comprendido entre 1,5 y 4 horas.

25 La policondensación se puede finalizar cuando se alcanza la viscosidad intrínseca pretendida. Esto se puede controlar determinando el par de torsión de un agitador que se dispone en el reactor en el que se realiza la policondensación. Se puede controlar también, por ejemplo, mediante un viscosímetro de fusión en la salida del reactor en una disposición de proceso continuo. Cuando la viscosidad es suficientemente elevada, se detiene la policondensación y se descarga el producto, obteniéndose el policondensado.

30 Como se indicó anteriormente, la policondensación se realiza preferentemente en presencia de un catalizador de la policondensación. Se pueden utilizar muchos catalizadores de la policondensación. Dichos catalizadores comprenden los catalizadores con uno o más elementos seleccionados de entre estaño, titanio, cinc, antimonio, calcio, manganeso, cobalto, hafnio, plomo, magnesio, aluminio, cerio, zirconio y mezclas de los mismos. Dichos compuestos pueden ser las sales de acetato o carbonato de dichos metales. Alternativamente, también son posibles los alcóxidos metálicos, compuestos metálicos de alquilo u otros compuestos organometálicos. Otros catalizadores aptos comprenden los óxidos y haluros de los elementos mencionados anteriormente. Los catalizadores preferidos comprenden alcóxidos de titanio, acetato de antimonio, óxido de antimonio y glicolato de antimonio, es decir, el producto de la reacción entre el óxido de antimonio y el etilenglicol. Las cantidades del catalizador de la policondensación se encuentran normalmente comprendidas entre un 0,005% en moles y un 0,2% en moles, basándose en el número de moles de ácido 2,5-furandicarboxílico de la mezcla inicial, preferentemente entre un 0,01 y un 0,10% en moles.

35 Los catalizadores de la policondensación se pueden añadir al compuesto de éster cuando se ha formado el compuesto de éster. También es posible añadir el catalizador de la policondensación a la mezcla inicial de ácido 2,5-furandicarboxílico y etilenglicol, opcionalmente en presencia de un catalizador de la esterificación. El catalizador de la esterificación, si se utiliza, se encuentra presente convenientemente en una cantidad comprendida entre un 0,005% en moles y un 0,2% en moles, basándose en el número de moles de ácido 2,5-furandicarboxílico. Cuando el catalizador de la policondensación se añade a la mezcla inicial o en un punto intermedio del procedimiento de esterificación, el compuesto de éster formado no se aísla apropiadamente. En un procedimiento por lotes, tras la formación del compuesto de éster, se mantiene el producto resultante preferentemente en la zona de la reacción en la que se realizó la esterificación y el producto como tal se somete a una reducción de la presión en la etapa de policondensación previa. En un procedimiento continuo, tras la formación del compuesto de éster, el producto resultante se transporta al siguiente recipiente de reacción y se somete a una reducción de la presión para alcanzar la evaporación del exceso de etilenglicol a fin de iniciar la etapa de policondensación previa.

40 45 50 55 60 Cuando la viscosidad es suficientemente elevada, se detiene la policondensación y se descarga el producto, obteniéndose el policondensado. La operación de descarga se puede realizar de diversos modos en función de la naturaleza del procedimiento de policondensación. Por ejemplo, si la policondensación se realiza por lotes, se puede efectuar convenientemente la descarga cerrando el vacío y aplicando presión en el recipiente de la reacción con nitrógeno u otro gas inerte. Se puede descargar también utilizando bombas de engranajes, ya sea

bajo presión o en vacío. Si la policondensación se realiza de un modo continuo, la descarga también se realiza convenientemente de un modo continuo, por ejemplo, utilizando bombas de engranajes para eliminar el policondensado del recipiente de la reacción.

5 Se puede continuar procesando el policondensado incluso en forma de masa fundida. Por ejemplo, se puede dirigir mediante bombas y/o prensas de extrusión a través de un aparato de filtración de fundido a un conjunto de tobera para hilar, en el que se forma directamente en fibras hiladas por fusión y se somete a operaciones de estiramiento para formar un haz de filamentos y someterse a operaciones adicionales opcionales para formar un hilo multifilamento. Por el contrario, se podría pasar a través de un troquel para formar una lámina y enfriarse en  
10 una serie de rodillos para formar una lámina o película apta, por ejemplo, para utilizar en operaciones de conformación térmica. Se ha descubierto que resulta muy ventajoso tratar la masa fundida policondensada obtenida de este modo en una etapa de granulación, de tal modo que se obtengan partículas sólidas. Para ello, se puede hacer pasar la masa fundida a través de una matriz que produce hebras que se enfrían en agua y que se cortan a continuación en partículas pequeñas. Dichas partículas presentan normalmente un tamaño uniforme y una forma cilíndrica. Asimismo, se puede someter la masa fundida a un procedimiento conocido como "granulación subacuática" o "corte frontal con troquel", en el que se pasa la masa fundida a través de una matriz, con una gran cantidad de orificios, que entra en contacto por un lado con un medio refrigerante, tal como agua, y se utiliza un cubo giratorio de cuchillas para cortar la masa fundida emergente a fin de formar gránulos. Dichas partículas presentan normalmente un tamaño uniforme y una forma aproximadamente esférica. También se  
20 pueden utilizar otros procedimientos. A título de ejemplo, los fragmentos sólidos de policondensado se pueden triturar en partículas pequeñas. Las partículas son ventajosamente de tal modo que el número medio de partículas por gramo se encuentra comprendido entre 40 y 350 partículas por gramo. Normalmente, dicho tamaño de partícula se reduce a partículas de poliéster con una masa comprendida entre 2,8 y 25 mg por partícula. Se ha descubierto que cuando se realiza la etapa de policondensación para obtener un policondensado con una viscosidad intrínseca superior a 0,45 y, más preferentemente, superior a 0,50, por ejemplo superior a  
25 aproximadamente 0,52 dl/g, la etapa en la que se convierte la masa fundida de policondensado en partículas resulta más eficiente, con menos alteraciones en el procedimiento debidas a roturas de la cadena y con una distribución más uniforme de tamaños de partículas y con menos polvo o granos menudos. Esto es conveniente para un procesamiento adicional de las partículas de policondensado.

30 Cuando se recupera el policondensado como material sólido de la etapa de policondensación, el policondensado es bastante amorfo. Para convertir el policondensado en un material más cristalino, el policondensado se cristaliza preferentemente a una temperatura comprendida entre 90 y 200 °C. Para ello, el policondensado se somete a una etapa de calentamiento, mientras se encuentra todavía en estado sólido, a la temperatura  
35 indicada. En ciertas disposiciones, la etapa de calentamiento puede implicar el control de la temperatura de los gránulos durante la granulación de tal modo que la temperatura final de los gránulos se encuentre en un intervalo en el que se produzca la cristalización. Antes de cualquier etapa de calentamiento adicional, se elimina el agua adherida de la etapa de granulación. Dicho procedimiento se realiza convenientemente disponiendo la temperatura del policondensado a la temperatura pretendida en el intervalo de 90 a 200 °C. En el caso del poli(2,5-furandicarboxilato de etileno) se ha descubierto que la cristalización más rápida se produce a aproximadamente 170 °C. También se ha descubierto que, si las partículas se mantienen durante aproximadamente 1 hora entre 90 y 120 °C, la cristalización posterior a 170 °C es más rápida. La etapa de calentamiento se puede realizar convenientemente a la presión atmosférica o en vacío. El calor se puede proporcionar convenientemente mediante un baño María. El programa de temperatura óptimo dependerá de las  
45 disposiciones particulares utilizadas en la cristalización. Normalmente, se mantiene el policondensado a una temperatura comprendida entre 90 y 140 °C durante un período comprendido entre 0,2 y 2,5 horas, y a continuación se procede a una etapa de cristalización de entre 1 y 48 horas a una temperatura comprendida entre 120 °C y 200 °C. Se ha descubierto que las cadenas de poliéster del policondensado cristalizan en dichas condiciones produciendo el poliéster semicristalino. El poliéster obtenido de este modo tiene, a modo de ventaja, una cristalinidad de por lo menos 25 J/g, medida por DSC. Presenta convenientemente una temperatura de fusión de por lo menos 215 °C. El policondensado presenta asimismo un contenido relativo en grupos terminales ácido carboxílico, expresado como la fracción de la cantidad molar de grupos terminales ácido carboxílico dividida por la suma de cantidades molares de grupos terminales hidroxilo y grupos terminales ácido carboxílico,  
50 comprendido entre 0,10 y 0,7.

55 Según la presente invención, se puede utilizar un sistema de granulación subacuática que produce gránulos del polímero según la presente invención en unas condiciones de calor suficiente para iniciar por sí mismo el procedimiento de cristalización y proporcionar finalmente un carácter suficientemente cristalino de tal modo que los gránulos de poliéster obtenidos no requieren una etapa de calentamiento independiente para que se  
60 cristalicen. Dicho estado de calor elevado se puede alcanzar reduciendo el período de permanencia de los gránulos en la suspensión acuosa a fin de dejar suficiente calor en los gránulos de poliéster durante la etapa de secado, de tal modo que el procedimiento de cristalización se inicia desde el interior de los gránulos. Para ello, se pretende separar los gránulos del agua lo antes posible y aumentar significativamente la velocidad del flujo de los gránulos desde la salida del granulador subacuático hacia y a través de un secador. Los gránulos calientes

que abandonan el secador se pueden transportar a continuación en un transportador vibratorio convencional u otro equipo vibrador o de manipulación durante un período suficiente para alcanzar la cristalinidad pretendida y evitar la aglomeración. Los gránulos calientes se pueden almacenar, asimismo, en un estado de conservación del calor, tal como en un recipiente aislante del calor, cajas de acero inoxidable que se utilizan tradicionalmente para el tereftalato de polietileno. Este sistema es similar al descrito para el tereftalato de polietileno en la patente US 8366428.

El policondensado se puede someter a una etapa en estado sólido posterior. Dicha etapa se realiza convenientemente a una temperatura comprendida entre 180 °C y 210 ° C, pero en todos los casos inferior a la temperatura de fusión del policondensado. La presión puede ser elevada, pero es convenientemente la ambiental con circulación de gas inerte o puede ser inferior a la presión atmosférica, por ejemplo, inferior a 100 mbar. La etapa en estado sólido se puede realizar durante un período de hasta 120 horas, convenientemente entre 2 y 60 horas, según sea necesario para alcanzar el peso molecular final pretendido.

La presente invención se continuará ilustrando mediante los ejemplos siguientes.

#### EJEMPLOS

En los ejemplos siguientes, se determinaron las cantidades de los grupos terminales hidroxilo (HEG) y los grupos dietilenglicol (DEG) mediante <sup>1</sup>H-NMR utilizando el procedimiento indicado en la descripción anterior. En los experimentos, se registraron espectros de resonancia magnética nuclear (NMR) de <sup>1</sup>H (desacoplamiento restringido inverso) en una NMR digital Bruker Avance 500 con Cryo Platform utilizando el disolvente residual como estándar interno. El análisis de NMR se realizó unas horas después de haber preparado la muestra. El contenido en grupos terminales carboxílicos se determinó por valoración.

Los resultados de dichas determinaciones son las cantidades de los grupos terminales correspondientes expresados en meq/kg. En el caso del contenido relativo de grupos terminales ácido carboxílico basándose en la suma de los grupos terminales ácido carboxílico y los grupos terminales hidroxilo se utiliza la fórmula siguiente:

$$\text{CEG}/(\text{CEG} + \text{HEG})$$

#### EJEMPLO 1

Se realizaron experimentos sobre el efecto del hidróxido de tetraetilamonio (TEAOH) y el hidróxido de tetrametilamonio (TMAOH) en la formación de los DEG durante la polimerización del FDCA con etilenglicol. Se utilizó una carga de 10 g de FDCA en cada experimento. La relación de alimentación entre el etilenglicol y el FDCA fue de aproximadamente 1,3/1 (la mezcla es deficiente en proporciones inferiores, pero el experimento demuestra todavía la eficacia del TEOH y del TMAOH). El catalizador fue antimonio, en una relación molar del 0,04% en moles basándose en el FDCA. Se realizó la esterificación a 220 °C y unos tiempos comprendidos entre 90 y 160 minutos según fuese necesario para completar sustancialmente la esterificación. Se redujo la presión y se realizó la policondensación a unas temperaturas comprendidas entre 240 y 260 °C durante un periodo de entre 90 y 120 minutos. La tabla 1 presenta el nivel de adición y el nivel resultante de DEG en el producto.

Tabla 1

Nivel de adición, ppm (p) [número de pases]	Adición, (mmol/mol FDCA)	Contenido en DEG, mol/mol
0 [n=3]	0	0,048
120 ppm TEOH [n=2]	0,13	0,041
135 ppm TEOH [n=2]	0,14	0,038
270 ppm TEOH [n=4]	0,29	0,033
450 ppm TEOH [n=2]	0,48	0,028
43 ppm TMAOH [n=1]	0,07	0,041
86 ppm TMAOH [n=2]	0,15	0,036
172 ppm TMAOH [n=4]	0,29	0,031

#### EJEMPLO 2

Se realizaron diversas polimerizaciones para mostrar la preparación del poliéster según la presente invención.

Se mezclaron etilenglicol (MEG) y ácido 2,5-furandicarboxílico (FDCA) con una relación molar de MEG:FDCA de 1,15 o 1,30 junto con  $Sb_2O_3$  como catalizador, presente en 314 ppm de antimonio. Las mezclas de la reacción de los experimentos 1 y 3 comprendían además 42 ppm de TEAOH (0,04 mmol/mol MEG) y la mezcla de la reacción del experimento 2 comprendía 80 ppm (0,09 mmol/mol) de TEAOH. Se sometieron las mezclas a esterificación sin adición de un catalizador de esterificación durante un período de tiempo ( $t_e$ ) a una temperatura elevada. Se evaporó el agua que se formó y se pasó a una columna de destilación. Se eliminó el agua condensada y cualquier MEG que se arrastró o se evaporó se recicló de nuevo a la mezcla de la reacción. Se continuó la reacción a presión atmosférica hasta que se recogió el 85% de la cantidad teórica de agua, basándose en la alimentación de ácido furandicarboxílico. La temperatura en dicho instante era de 240 °C y el tiempo de reacción era de 270 minutos. Se redujo la presión y se inició la policondensación previa, alcanzando la presión 20 mbar en aproximadamente 70 minutos. Se cambió la toma de vacío en este punto de tal modo que se pudiera eliminar cualquier etilenglicol adicional sin pasar a través de la columna de destilación. La presión se redujo aún más, a menos de 5 mbar. Se sometió al compuesto de éster con el catalizador a una policondensación a una temperatura de 245 °C o 251 °C, tal como se indica en la tabla 2. Se continuó la policondensación durante un período  $t_p$  hasta que la viscosidad intrínseca (IV) fue de aproximadamente 0,5 dl/g. La velocidad de policondensación (velocidad P) se calculó como la velocidad del aumento de la IV (\*1000) in dl/g por minuto. Los CEG relativos se determinaron como  $CEG/(CEG + HEG)$ , expresándose los CEG y los HEG en meq/kg. El contenido en dietilenglicol (DEG) se expresa en moles por mol de furandicarboxilato, determinado mediante  $^1H$  NMR. Las condiciones de la reacción y los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Exp. N°	Esterificación					Policondens.		Vel. P	HEG,	CEG	Rel. CEG	DEG,
	MEG/FDCA	T, °C	$t_e$ , min	$P_{H_2O}$ , bar	EsPo	T, °C	$T_p$ , min					
1	1,15	241	270	33,8	0,76	245	160	5,18	121	19	0,14	0,036
2	1,15	241	270	33,8	0,76	245	170	4,88	130	16	0,11	0,040
3	1,30	244	268	35,7	3,21	251	270	2,61	120	6	0,05	0,041

Los resultados demuestran que la utilización de TEAOH permite obtener poliésteres con un contenido en DEG inferior a 0,045. mol/mol. La comparación de los resultados de los experimentos n.º 1 y 3 también demuestra que con un mayor exceso de etilenglicol en la mezcla de partida también aumenta el nivel de grupos DEG en el poliéster resultante.

## EJEMPLO 3

Se repitió el procedimiento del ejemplo 2 con distintas proporciones de MEG/FDCA y distintas temperaturas. Cada mezcla de la reacción comprendía además 80 ppm de TEAOH (0,09 mmol/mol MEG). Se continuaron las reacciones de policondensación hasta que se obtuvo una IV algo más elevada que en el ejemplo 2. Los CEG relativos se determinaron como  $CEG/(CEG + HEG)$ . También se determinó el contenido en DEG. Las condiciones y los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Exp. N°	Policondens.				IV, dl/g		IV, dl/g	Vel. P	rel. CEG	HEG, meq/kg	CEG, meq/kg	DEG, mol/mol
	MEG/FDCA	T, °C	$t_e$ , min	EsPo	T, °C	$T_p$ , min						
4	1,18	225	157	0,82	261	147	0,41	2,77	0,10	142	16	0,041
5	1,12	216	150	0,31	262	179	0,59	3,28	0,23	62	19	0,040
6	1,11	213	140	0,24	261	140	0,61	4,35	0,54	35	35	0,040
7	1,12	214	175	0,29	261	150	0,61	4,06	0,30	59	25	0,041

Los resultados demuestran que con distintas temperaturas de esterificación y policondensación o con relaciones variables del material inicial, se puede inhibir la formación de dietilenglicol añadiendo TEAOH.

Se determinaron las propiedades de absorbancia de los poliésteres de los experimentos 6 y 7 y se halló que eran 0,023 y 0,035, respectivamente, determinadas como una disolución de 30 mg/ml en una mezcla de diclorometano:hexafluoroisopropanol de 8:2 (vol/vol) a 400 nm.

5

## EJEMPLO 4

Se prepararon muestras de poli(2,5-furandicarboxilato de etileno) con unos niveles variables de DEG. En una primera serie de pases, se dispusieron las muestras en bandejas DSC y se sometieron a una etapa inicial de fusión, seguida por una cristalización isotérmica de la masa fundida a 170 °C durante 73 minutos. A continuación, se determinó la temperatura de fusión ( $T_m$ ) de los poliésteres semicristalinos resultantes mediante DSC. Las temperaturas de fusión resultantes se muestran en la tabla 4 a continuación. En una segunda serie de pases, se trataron dos de los mismos polímeros mediante cristalización isotérmica de la masa fundida a 170 °C durante 1 hora, y seguidamente hubo una etapa adicional de fijación por calor de 1 hora de calentamiento isotérmico a 195 °C o 205 °C. Tras la fijación por calor, se analizaron los polímeros mediante DSC para determinar la temperatura de fusión máxima y la cristalinidad neta (expresada como entalpía neta ( $H_m$ ) en J/g). Estos resultados se muestran en la tabla 4.

10

15

Tabla 4

Muestra	DEG mol/mol	170 °C fijación,		Fijación adicional a 195 °C		Fijación adicional a 205 °C	
		$T_m$ (°C)	$T_m$ (°C)	$H_m$ (J/g)	$T_m$ (°C)	$H_m$ (J/g)	
1	0,025	210,2	215,5	50	222	51	
2	0,043	206,1	210,4	46	221	40	
3	0,058	204,3	216,2	45	221	21	
4	0,107	197,0	205,1	2	Fundido	0	

Estos datos demuestran el impacto negativo del aumento de los niveles de los DEG, que provoca la disminución de la temperatura de fusión y la reducción del grado de cristalización. Cuando se intenta fijar por calor a temperaturas más elevadas, tales como 195 °C o 205 °C, para aumentar la temperatura de fusión, las muestras con un mayor contenido en DEG realmente se derriten en vez de aumentar la cristalinidad. Las muestras con unos niveles inferiores DEG presentaban una  $T_m$  más elevada y unos mayores niveles de cristalinidad, determinada mediante  $H_m$ . También disminuyó la temperatura de vitrificación de las muestras con un contenido superior en DEG, con respecto a las muestras con contenido inferior en DEG. Esto puede tener un efecto negativo en la estabilidad térmica y las propiedades mecánicas de los productos formados.

20

25

## EJEMPLO 5

30

Se realizaron experimentos sobre el efecto del  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y el  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  en la formación de los DEG durante la polimerización del FDCA con etilenglicol. Se utilizó una carga de 10 g de FDCA en cada experimento. La relación de alimentación entre el etilenglicol y el FDCA fue de aproximadamente 1,25/1. El catalizador fue antimonio, en una relación molar del 0,03% en moles con base al FDCA. Se realizó la esterificación a 220 °C y unos tiempos comprendidos entre 155 y 165 minutos según fuese necesario para completar sustancialmente la esterificación. Se redujo la presión y se realizó la policondensación a una temperatura de 245 °C durante 90 minutos. La tabla 5 siguiente presenta el nivel de adición y el nivel resultante de DEG en el producto.

35

40

Tabla 5

Nivel de adición, ppm (p)	Adición, (mmol/mol FDCA)	Contenido en DEG, mol/mol
Sin catalizador, sin aditivo	0	0,088
160 ppm $\text{Na}_2\text{HPO}_4$	0,14	0,038
320 ppm $\text{Na}_2\text{HPO}_4$	0,28	0,033
640 ppm $\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,70	0,041

45

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Poliéster que comprende unidades de 2,5-furandicarboxilato de etileno, cuyo poliéster comprende también grupos dietilenglicol, siendo el contenido de grupos dietilenglicol inferior a 0,045, en moles por mol de grupos 2,5-furandicarboxilato, y determinándose el contenido en grupos dietilenglicol mediante <sup>1</sup>H-NMR tal como se describe en la descripción.
- 10 2. Poliéster según la reivindicación 1, que presenta un contenido relativo en grupos terminales ácido carboxílico, expresado como la fracción de la cantidad molar de grupos terminales ácido carboxílico dividida por la suma de cantidades molares de grupos terminales hidroxilo y grupos terminales ácido carboxílico, comprendido entre 0,10 y 0,70, en el que los contenidos en grupos terminales ácido carboxílico y de grupos terminales hidroxilo se determinan tal como se ha descrito en la descripción.
- 15 3. Poliéster según cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, en el que la cantidad de grupos terminales ácido carboxílico está comprendida entre 15 y 122 meq/kg, determinándose la cantidad de grupos terminales ácido carboxílico utilizando el procedimiento de valoración según ASTM D7409, adaptado al poli(2,5-furandicarboxilato de etileno).
- 20 4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, que presenta una viscosidad intrínseca de por lo menos 0,45 dl/g, preferentemente presenta una viscosidad intrínseca de como máximo 1,0 dl/g, en el que la viscosidad intrínseca se determina tal como se ha descrito en la descripción.
- 25 5. Poliéster según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que presenta una cristalinidad de por lo menos 25 J/g, determinada mediante calorimetría de exploración diferencial (DSC).
- 30 6. Poliéster según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que presenta una temperatura de fusión de por lo menos 215 °C.
- 35 7. Compuesto que comprende el poliéster según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que presenta un contenido en humedad de como máximo 100 ppm, determinado según la norma ISO 15512.
- 40 8. Procedimiento destinado a la preparación de un poliéster, en el que una mezcla inicial que comprende ácido 2,5-furandicarboxílico y etilenglicol o que comprende un éster dialquílico del ácido 2,5-furandicarboxílico y etilenglicol se somete a esterificación o transesterificación para formar una composición de éster, y la composición de éster obtenida de este modo se somete a policondensación en una presión reducida en presencia de un catalizador de la policondensación para obtener un policondensado, produciéndose la esterificación o transesterificación en presencia de un compuesto básico y/o un compuesto de amonio capaz de inhibir la formación de dietilenglicol.
- 45 9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que se selecciona el compuesto básico o de amonio de entre el grupo que comprende compuestos de tetraalquilamonio, colina, sales de metales alcalinos de ácidos carboxílicos, sales de metales alcalinotérreos de ácidos carboxílicos, sales alcalinas básicas de ácidos minerales, sales básicas de metales alcalinotérreos de ácidos minerales, hidróxidos de metales alcalinos, hidróxidos de amonio y combinaciones de los mismos.
- 50 10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 9, en el que la mezcla inicial comprende ácido 2,5-furandicarboxílico y etilenglicol, realizándose la reacción de esterificación entre el ácido 2,5-furandicarboxílico y el etilenglicol preferentemente a una temperatura comprendida entre 160 y 240 °C y a una presión comprendida entre 0,9 y 5 bar durante un período comprendido entre 0,5 y 4 h.
- 55 11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que la policondensación comprende una reacción de policondensación previa realizada a una presión comprendida entre 20 a 700 mbar y una reacción de policondensación realizada entre 0,05 y 20 mbar.
- 60 12. Procedimiento según la reivindicación 11, en el que el período combinado para las reacciones de policondensación previa y policondensación se encuentra comprendido entre 1,5 y 5 horas.
13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, en el que, durante la etapa de policondensación, el etilenglicol que se forma se separa del compuesto de éster que se somete a policondensación.
14. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 13, en el que el policondensado se cristaliza a una temperatura comprendida entre 90 y 200 °C.

15. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 14, que comprende además una etapa de polimerización en estado sólido, preferentemente realizada a una temperatura comprendida entre 180 °C y 210 °C.