





MODELACIÓN PARAMÉTRICA Y MANUFACTURA DE MEZCLADORES PARA  
EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS UTILIZANDO SISTEMAS CAD-CAM

JUAN SEBASTIÁN MARÍN URREGO  
LUÍS FELIPE ROMERO ESCOBAR

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ÁREA DE PLÁSTICOS  
MEDELLÍN  
2008

MODELACIÓN PARAMÉTRICA Y MANUFACTURA DE MEZCLADORES PARA  
EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS UTILIZANDO SISTEMAS CAD-CAM

JUAN SEBASTIÁN MARÍN URREGO  
LUÍS FELIPE ROMERO ESCOBAR

Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Carlos Arturo Rodríguez Arroyave

Ingeniero Mecánico

Magíster en Procesamiento de Polímeros

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ÁREA DE PLÁSTICOS  
MEDELLÍN  
2008

A nuestros padres, que gracias a su enorme esfuerzo, apoyo y dedicación, fue posible alcanzar el sueño de ser profesionales.

## AGRADECIMIENTOS

Al asesor del presente proyecto, Carlos Arturo Rodríguez Arroyave, Ingeniero Mecánico y profesor del Departamento de Ingeniería de Producción de la Universidad Eafit, por toda su colaboración de manera desinteresada durante la elaboración de dicho trabajo.

Y en general, a todas aquellas personas que de cualquier forma contribuyeron para que este proyecto fuera realizado de manera satisfactoria.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
0. INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	13
1.1. GENERAL	13
1.2. ESPECÍFICOS	13
2. EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS	14
3. GENERALIDADES DE LOS MEZCLADORES	16
3.1. DEFINICIÓN	16
3.2. TIPOS DE MEZCLADO	17
3.3. SECCIONES DE MEZCLADO	19
4. MEZCLADORES DISTRIBUTIVOS	20
4.1. MEZCLADORES DE CAVIDAD	20
4.2. MEZCLADORES DE PINES	22
4.3. MEZCLADORES DE ALETAS	23
4.4. MEZCLADORES DE PROFUNDIDAD VARIABLE	25
4.5. MEZCLADORES DE ROMBOIDES	26
4.6. COMPARATIVO ENTRE MEZCLADORES DISTRIBUTIVOS	28
5. MEZCLADORES DISPERSIVOS	30
5.1. MEZCLADOR DE ANILLO BLISTER	30
5.2. MEZCLADORES DE ESTRÍAS	31
5.3. MEZCLADORES DE ENGRANAJES	34
5.4. MEZCLADOR CRD	35
5.5. COMPARATIVO ENTRE MEZCLADORES DISPERSIVOS	37
6. DEFINICIÓN VARIABLES DE MODELACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN	38
6.1. MEZCLADOR DE ANILLO BLISTER	38

	pág.
6.2. MEZCLADOR AXON	38
6.3. MEZCLADOR DE PINES	39
6.4. MEZCLADOR DE ROMBOIDES	39
6.5. MEZCLADOR DULMAGE	39
6.6. MEZCLADOR DOUBLE WAVE	40
6.7. MEZCLADOR EGAN	40
6.8. MEZCLADOR MADDOCK	41
6.9. MEZCLADOR SAXTON	41
7. SOFTWARE UTILIZADO PARA EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN	42
8. FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN "MIXERS MODELING"	43
8.1. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL SISTEMA	43
8.2. INSTALACIÓN	44
8.3. EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN "MIXERS MODELING"	45
9. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN	60
9.1. ESTRUCTURA DEL ASISTENTE	60
9.2. CONFIGURACIÓN DEL ASISTENTE	63
10. MAQUINADO DEL MEZCLADOR	68
11. PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES	74
12. CONCLUSIONES	75
13. BIBLIOGRAFÍA	77
13.1. CLÁSICA	77
13.2. INTERNET	79

## TABLA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Esquema de una extrusora convencional	14
Ilustración 2. Mezclas	19
Ilustración 3. Mezclador de transferencia de cavidad	21
Ilustración 4. Mezclador de anillos	22
Ilustración 5. Mezclador de Pines	22
Ilustración 6. Extrusora con barril de pines	23
Ilustración 7. Mezclador tipo Axon	24
Ilustración 8. Mezclador tipo Dulmage	24
Ilustración 9. Mezclador Saxton	25
Ilustración 10. Mezclador de doble onda	25
Ilustración 11. Mezcladores tipo Pulsar y Strata Blend	26
Ilustración 12. Geometrías de mezcladores de romboides	27
Ilustración 13. Parámetros geométricos en el diseño de un mezclador romboidal	28
Ilustración 14. Tabla comparativa entre mezcladores distributivos	29
Ilustración 15. Mezclador anillo Blister	31
Ilustración 16. Mezclador Egan	31
Ilustración 17. Mezclador LeRoy	32
Ilustración 18. Variación de la presión con el ángulo de hélice	33
Ilustración 19. Mezclador tipo Zorro	33
Ilustración 20. Mezclador de engranajes	34
Ilustración 21. Mezclador CRD con separación de aletas de limpieza	36
Ilustración 22. CRD con segmentos de limpieza en aletas de mezclado	36
Ilustración 23. Tabla comparativa entre mezcladores dispersivos	37
Ilustración 24. Icono de la aplicación	44

	pág.
Ilustración 25. Pantalla de presentación	45
Ilustración 26. Pantalla de opciones	46
Ilustración 27. Pantalla mezclador de pines	48
Ilustración 28. Pantalla mezclador Axon	49
Ilustración 29. Pantalla mezclador Dulmage	50
Ilustración 30. Pantalla mezclador Saxton	51
Ilustración 31. Pantalla mezclador Double Wave	52
Ilustración 32. Pantalla mezclador de Romboides	53
Ilustración 33. Pantalla mezclador Blister Ring	54
Ilustración 34. Pantalla mezclador Maddock	55
Ilustración 35. Pantalla mezclador Egan	56
Ilustración 36. Pantalla de puntas	57
Ilustración 37. Pantalla sin punta	58
Ilustración 38. Modelación mezclador Maddock	59
Ilustración 39. Plano mezclador Maddock	59
Ilustración 40. Código en Visual Basic	62
Ilustración 41. Mezclador de pines modelado	63
Ilustración 42. Mezclador Axon modelado	64
Ilustración 43. Mezclador Dulmage modelado	64
Ilustración 44. Mezclador Saxton modelado	65
Ilustración 45. Mezclador Double Wave modelado	65
Ilustración 46. Mezclador de romboides modelado	66
Ilustración 47. Mezclador de anillo Blister modelado	66
Ilustración 48. Mezclador Maddock modelado	67
Ilustración 49. Mezclador Egan modelado	67
Ilustración 50. Centro de mecanizado Milltronics	68
Ilustración 51. Corte transversal del eje con sierra de disco	70

	pág.
Ilustración 52. Refrentado en torno convencional	70
Ilustración 53. Montaje del eje a maquinar	71
Ilustración 54. Ubicación de las coordenadas	72
Ilustración 55. Proceso de maquinado del mezclador de romboides	72
Ilustración 56. Prototipo de mezclador maquinado	73

## 0. INTRODUCCIÓN

En la fabricación de ciertos productos plásticos mediante el proceso de extrusión es necesario agregar aditivos para obtener unas características determinadas de apariencia y resistencia. El proceso de mezclado es realizado generalmente por el tornillo extrusor, sin embargo, existen casos en los cuales debido a las características de la mezcla se requieren elementos adicionales para homogenizarla. En estos casos se emplean mezcladores, ya sean de tipo distributivos o dispersivos.

A pesar de que se han patentado varios tipos de mezcladores, la industria frecuentemente desconoce su uso, por lo tanto ignora sus grandes beneficios. Debido a lo anterior, no se ha prestado mayor interés en el tema y los desarrollos tecnológicos son mínimos, es por esto que no se encuentran actualmente aplicaciones que permitan modelar de forma rápida y simplificada dichos accesorios, como si se ha hecho con los tornillos de extrusión.

El proyecto comprende el diseño, desarrollo y la evaluación de una aplicación para la modelación paramétrica de mezcladores para extrusión de polímeros termoplásticos. En una primera etapa se reúne toda la información pertinente para escoger los tipos de mezcladores más estándares y de mayor uso en el mercado, para luego verificar su diseño y geometría con el fin de proceder a realizar la interfase entre Visual Basic y el software CAD elegido.

Durante el desarrollo de este trabajo se elabora un prototipo en resina de un mezclador a partir del diseño obtenido por dicha aplicación. Este prototipo sirve como criterio de evaluación para el proyecto.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional que permita la modelación parametrizada de mezcladores para extrusión de termoplásticos basada en una interfase entre aplicaciones de Visual Basic y una plataforma de CAD comercial como SolidWorks

### 1.2. ESPECÍFICOS

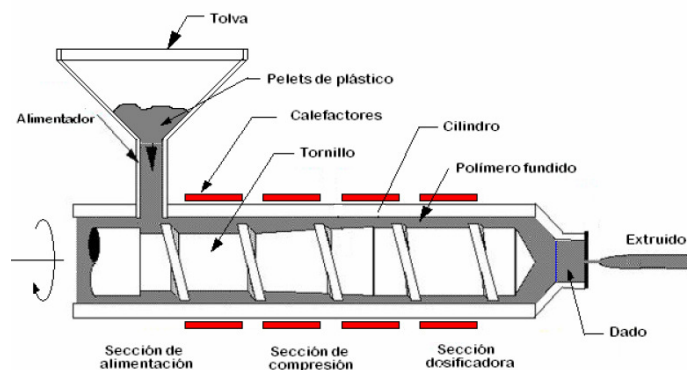
- Objetivo 1: Identificar y clasificar los diferentes tipos de mezcladores para extrusión de termoplásticos.
- Objetivo 2: Definir las variables de modelación y parametrización de cada uno de los mezcladores.
- Objetivo 3: Desarrollar una aplicación que permita modelar de forma rápida y simple los mezcladores de acuerdo con los requerimientos del usuario.
- Objetivo 4: Fabricar un prototipo de un mezclador mediante el uso de un Software CAM y maquinaria CNC a partir de la aplicación desarrollada.
- Objetivo 5: Evaluar el desempeño de la aplicación.
- Objetivo 6: Desarrollar con base en los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones para futuras aplicaciones.

## 2. EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS

Los plásticos se clasifican según su estructura interna en; termoplásticos, termoestables y elastómeros. Los polímeros termoplásticos son aquellos que se ablandan con el calor, pudiéndose moldear con nuevas formas que se conservan al enfriarse. Lo anterior es debido a que las macromoléculas están unidas por débiles fuerzas que se rompen con el calor.

La extrusión es un proceso industrial, que consiste en forzar a un material a pasar a través de una abertura denominada cabezal, por medio de un sistema de empuje que generalmente corresponde a un tornillo que gira concéntricamente en una cámara a temperatura controlada para obtener un perfil predeterminado. En la ilustración 1 se pueden observar las diferentes partes de una extrusora convencional.

Ilustración 1. Esquema de una extrusora convencional



PLASTICS TERMS@, 2007

Una extrusora debe realizar una secuencia de funciones con el fin de conseguir el mejor desempeño del sistema. Inicialmente almacena el polímero sólido para asegurar que continuamente exista material durante el proceso, para lo cual se

cuenta con una tolva cuya capacidad depende exclusivamente de la tasa de producción de la extrusora.

El material sólido debe ser transportado por el tornillo desde la zona de alimentación. Para asegurar una adecuada plastificación, la extrusora cuenta con una serie de resistencias ubicadas a lo largo de la camisa que contiene el husillo, además, existen otros calefactores encargados de mantener el cabezal a una determinada temperatura con el propósito de evitar la solidificación del polímero en instantes previos de culminar el proceso de extrusión. Además de la calefacción mediante las resistencias, la plastificación es llevada a cabo por un proceso mecánico debido a los esfuerzos de compresión y de cizalladura a los cuales es sometido el material polimérico.

Para lograr que el material tenga una óptima homogenización y que los aditivos y pigmentos se encuentren debidamente distribuidos, en ocasiones se utilizan algunos dispositivos de mezcla ubicados en el extremo del husillo antes de que el plástico fundido sea extruido. Finalmente, haciendo uso de la presión generada por el movimiento circular del tornillo, el material polimérico es forzado a fluir a través del cabezal adquiriendo la forma de este.

Como conclusión, se puede afirmar que la extrusión es uno de los procesos más importantes y básicos de la industria de la transformación del plástico. Procesos, tales como, la inyección, el soplado, calandrado, entre otros, requieren de la unidad de plastificación, que en la mayoría de los casos es una extrusora. (NORIEGA, 1996, 1)

### 3. GENERALIDADES DE LOS MEZCLADORES

En este capítulo se presenta un panorama amplio y completo respecto al objeto de estudio del proyecto. Primero, se exponen generalidades sobre mezcladores, para luego describir la clasificación y configuración de cada uno de ellos.

Son innumerables los hechos y factores que en la centuria de 1900 incidieron en la industria de los plásticos que hoy conocemos. Todos ellos provocaron una gran cantidad de avances, entre los cuales se destacan ampliamente el diseño y fabricación de diferentes clases de mezcladores, como por ejemplo, los mezcladores de tipo distributivo patentados por F.E. Dulmage en 1948 y R.B. Gregory en 1967, ó los de tipo dispersivo que aparecieron gracias al mismo R.B. Gregory en 1968 y G. LeRoy en 1969, y que hoy día llevan el nombre de sus inventores. (RDRAY@, 2002)

A pesar de que se han patentado tantos tipos de mezcladores, la industria desconoce su uso, por lo tanto ignora de sus grandes beneficios. Debido a lo anterior, no se ha prestado mayor interés en el tema y los desarrollos tecnológicos son mínimos, es por esto que no se encuentran actualmente aplicaciones que permitan modelar de forma rápida y simplificada dichos accesorios, como si se ha hecho con los tornillos de extrusión.

#### 3.1. DEFINICIÓN

El mezclado se define como un proceso para reducir la no uniformidad de una composición cuyo mecanismo básico es provocar el movimiento físico de los ingredientes. Los tipos de movimientos que pueden ocurrir son; difusión molecular, movimiento turbulento y movimiento convectivo. Los dos primeros movimientos se limitan esencialmente a gases y a líquidos de baja viscosidad. El

movimiento convectivo predomina en líquidos de alta viscosidad, como polímeros fundidos. Los polímeros fundidos no tienen la capacidad de realizar un movimiento turbulento debido a su alta viscosidad; el movimiento es siempre de tipo laminar. (RAUWENDAAL, 1994, 322)

El mezclado convectivo de flujo laminar se conoce simplemente como flujo laminar. Este es el tipo de mezclado que ocurre en la extrusión de polímeros fundidos. La acción de mezclado generalmente ocurre por flujo cortante y flujo de elongación. (Ibid., 322)

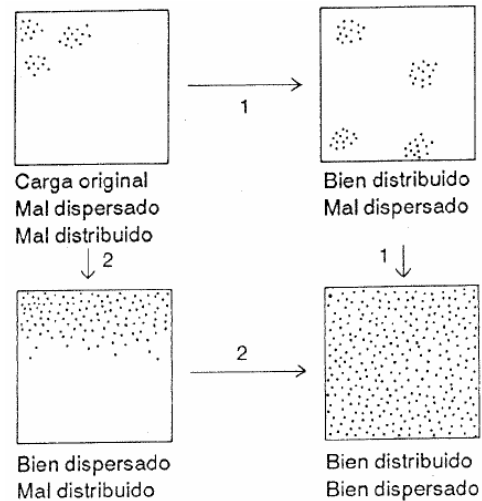
### 3.2. TIPOS DE MEZCLADO

Si los componentes que van a ser mezclados son fluidos y no exhiben un punto de cedencia, el mezclado es distributivo, o más comúnmente llamado mezclado extensivo. El proceso de mezclado distributivo puede ser descrito por la extensión o tensión de deformación, a la cual son expuestos los elementos del fluido. Los esfuerzos involucrados en este proceso son irrelevantes en la descripción del mezclado distributivo. Si la mezcla contiene componentes que exhiben un punto de cedencia, entonces los esfuerzos involucrados en el proceso llegan a ser muy importantes. Si los componentes que exhiben dicho punto de cedencia son sólidos se conoce como mezclado dispersivo o también como mezclado intensivo. En el mezclado dispersivo, el elemento sólido necesita ser desintegrado, pero para desintegrarlo el esfuerzo de cedencia debe ser excedido. Si el componente es un líquido el proceso de mezclado se conoce como homogenización, un ejemplo de mezclado dispersivo es la fabricación de un color concentrado donde la desintegración de los pigmentos aglomerados por debajo de cierto tamaño crítico es de crucial importancia. (Ibid., 322)

El mezclado distributivo y dispersivo no están físicamente separados. En el mezclado dispersivo siempre está presente el distributivo. El caso contrario no siempre se cumple. En el mezclado distributivo, puede estar el mezclado dispersivo solamente si está presente un componente sólido con un punto de cedencia y si el esfuerzo que actúa sobre el componente excede dicho esfuerzo. (HENSEN, 1988, 567)

Un aspecto de estudio de mezclado es la caracterización de la mezcla. Una completa caracterización requiere las especificaciones del tamaño, forma, orientación y localización espacial de cada elemento discreto de todos los elementos. Esto generalmente es imposible. Varias teorías y técnicas han sido ideadas para describir y medir la efectividad de la mezcla. Algunas de las técnicas de caracterización son absolutamente sofisticadas y consumen mucho tiempo. La caracterización cuantitativa es muy importante pero no es práctica en las operaciones de procesamiento de polímeros en la actualidad. La observación visual, aunque es cualitativa, a menudo lo suficientemente precisa para determinar cuando un producto es aceptable o no. (RAUWENDAAL, Op. cit., 322)

## Ilustración 2. Mezclas



MORTON, 1993,78

### 3.3. SECCIONES DE MEZCLADO

Hay ciertas características deseables para las secciones de mezclado en un husillo en general. Las características son:

- Debe generar una variación de presión, preferiblemente que auspicie la capacidad de bombeo hacia delante.
  - Debe permitir el flujo libre, los puntos muertos y las zonas de estancamiento deben evitarse.
  - Debe limpiar la superficie del barril totalmente; los surcos circunferenciales deben ser evitados
  - Debe ser fácil de ensamblar, instalar, operar y limpiar.
  - Debe tener un costo razonable y debe ser fácil de fabricar y mantener.
- (RAUWENDAAL, 1998, 84)

## 4. MEZCLADORES DISTRIBUTIVOS

Adicional a las características generales deseables para las secciones de mezclado, existen algunas características importantes para los mezcladores distributivos. Estas características son:

- El plástico fundido debe estar sujeto a un esfuerzo cortante significativo.
- El flujo debe ser fracturado constantemente con reorientación de los elementos del fluido. (RAUWENDAAL, Ibid., 84)

La fractura y reorientación es crítica para alcanzar un mezclado distributivo efectivo, porque la capacidad de mezclado se puede incrementar exponencialmente debido a estos fenómenos. (RAUWENDAAL, Ibid., 85)

Los mezcladores distributivos pueden dividirse en varios grupos principales: mezcladores de cavidad, mezcladores de aletas, mezcladores de pines, mezcladores de profundidad de canal variable y mezcladores de ancho de canal variable. (RAUWENDAAL, Ibid, 85)

### 4.1. MEZCLADORES DE CAVIDAD

Uno de los mezcladores de cavidad más conocidos es el mezclador de transferencia de cavidad o CTM<sup>1</sup>. Ver ilustración 3. (SCHOOL OF ENGINEERING UNIVERSITY OF BRADFORD@)

---

<sup>1</sup> CAVITY TRANSFER MIXER

Ilustración 3. Mezclador de transferencia de cavidad

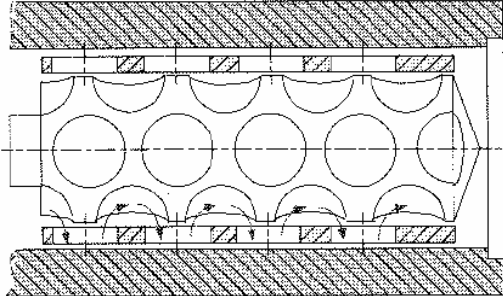


SCHOOL OF ENGINEERING UNIVERSITY OF BRADFORD@, 2000

Como el plástico viaja a través del mezclador el material es frecuentemente cortado y reorientado. Esta acción proporciona una buena capacidad de mezclado. Existen ciertas desventajas con este tipo de mezclador. Es un consumidor de presión lo que puede reducir la salida en el cabezal de la extrusora, causando también un incremento de la temperatura en el plástico fundido. Debido a que su geometría no permite el flujo libre del plástico, tiene un alto costo y su instalación y limpieza son complicadas. (SCHOOL OF ENGINEERING UNIVERSITY OF BRADFORD@, 2000)

Otro mezclador de cavidad es el mezclador de anillos, el cual es similar al anterior, pero tiene un anillo mezclador que se mueve libremente con cavidades circulares. Este anillo elimina las desventajas del mezclador anterior, es fácil de instalar y limpiar. Ver ilustración 4. (PLASTICS TECHNOLOGY@, 2007)

Ilustración 4. Mezclador de anillos

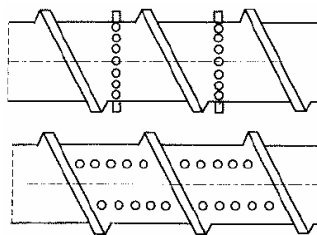


RAUWENDAAL, 1998, 86

#### 4.2. MEZCLADORES DE PINES

Los mezcladores de pines han estado en uso durante muchos años, se encuentran en gran cantidad de formas y tamaños. Comúnmente los pines son circulares, pero también pueden usarse otras formas como rectángulos, cuadrados y diamantes entre otros. Ver ilustración 5. (RAUWENDAAL EXTRUSION ENGINEERING@, 2006)

Ilustración 5. Mezclador de Pines



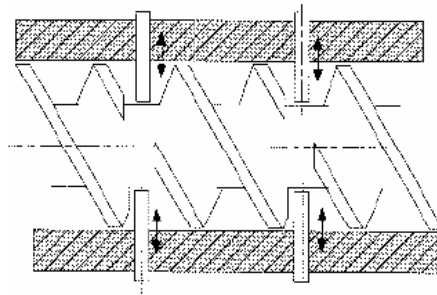
RAUWENDAAL, 1998, 86

Mediante los pines se alcanza un nivel moderado de fractura y reorientación, dando como resultado un incremento moderado en la eficiencia de mezclado. Una de las desventajas de este tipo de mezcladores es que los pines crean una restricción al flujo lo que puede reducir la salida en el cabezal de la extrusora.

Otra desventaja de este mezclador es que los pines pueden crear zonas de estancamiento, particularmente en las esquinas de los pines y en la raíz del tornillo. (RAUWENDAAL, Op cit., 86)

Un tipo especial de extrusora es la extrusora con barril de pines. En este tipo de extrusora los pines ubicados en varias posiciones del barril resaltan hasta la raíz del canal del tornillo. Ver ilustración 6. (RAUWENDAAL, Ibid., 87)

Ilustración 6. Extrusora con barril de pines



RAUWENDAAL, 1998, 87

Las ventajas de este tipo de mezclador en las aplicaciones para extrusión son buena capacidad de mezclado y bajo consumo de energía. Por estas características, la extrusora de pines ha llegado a ser muy popular en el procesamiento de caucho. En muchas extrusoras los pines son ajustables, lo que permite tener una facilidad de instalación y limpieza del tornillo y de la extrusora. (RAUWENDAAL, Ibid., 87)

#### 4.3. MEZCLADORES DE ALETAS

Existen una gran cantidad de mezcladores de aletas. El que tiene la forma más simple es el de sección tipo Axon, ilustración 7. (AXON MACHINERY@, 2007)

Ilustración 7. Mezclador tipo Axon

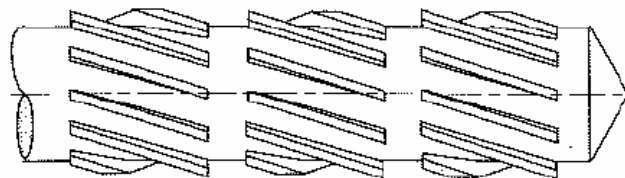


AXON MACHINERY@, 2007

Los mezcladores de aletas mas eficientes, son el Dulmage, Ilustración 8, y el mezclador tipo Saxton, Ilustración 9. Ambos mezcladores frecuentemente tienen reorientación y fractura, dando como resultado una efectiva acción de mezclado.

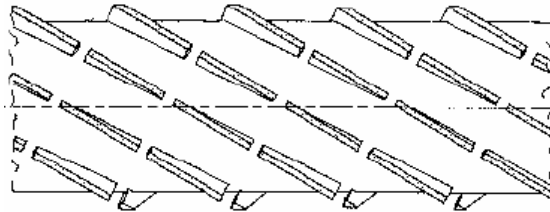
Debido a la orientación de sus aletas tienen la capacidad de generar bombeo hacia adelante lo que permite, además, de un buen mezclado, una alta capacidad de salida del material fundido por el cabezal. (RAUWENDAAL, Op.cit., 88)

Ilustración 8. Mezclador tipo Dulmage



RAUWENDAAL, 1998, 88

Ilustración 9. Mezclador Saxton



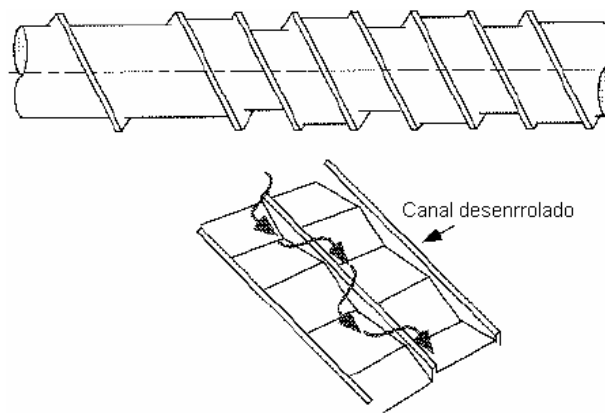
RAUWENDAAL, 1998, 88

La desventaja del mezclador Dulmage es que tiene aletas ubicadas circunferencialmente lo cual impide lograr total limpieza del barril por parte del mezclador. (RAUWENDAAL, Ibid., 88)

#### 4.4. MEZCLADORES DE PROFUNDIDAD VARIABLE

En estos mezcladores, la profundidad del canal se modifica para mejorar el mezclado. Uno de los mezcladores de profundidad variable es el tornillo de doble onda. Ver ilustración 10. (RAUWENDAAL, Ibid., 89)

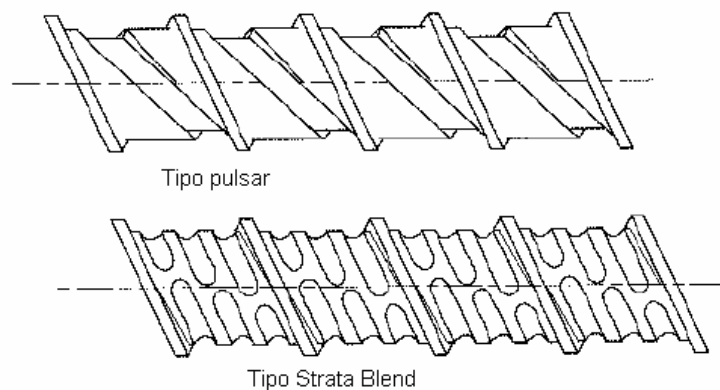
Ilustración 10. Mezclador de doble onda



RAUWENDAAL, 1998, 89

La profundidad del canal varia periódicamente, así, mientras en un lado la profundidad disminuye, en el otro aumenta. En este tipo de mezcladores no existe la posibilidad de generar fractura y reorientación, por lo tanto la capacidad de mezclado es bastante moderada. Otros mezcladores de este tipo son el tipo Pulsar y el tipo Strata-Blend, ilustración 11. Ninguno de ellos alcanza a ser eficiente en la fractura y reorientación. (RAUWENDAAL, Ibid., 89)

Ilustración 11. Mezcladores tipo Pulsar y Strata Blend



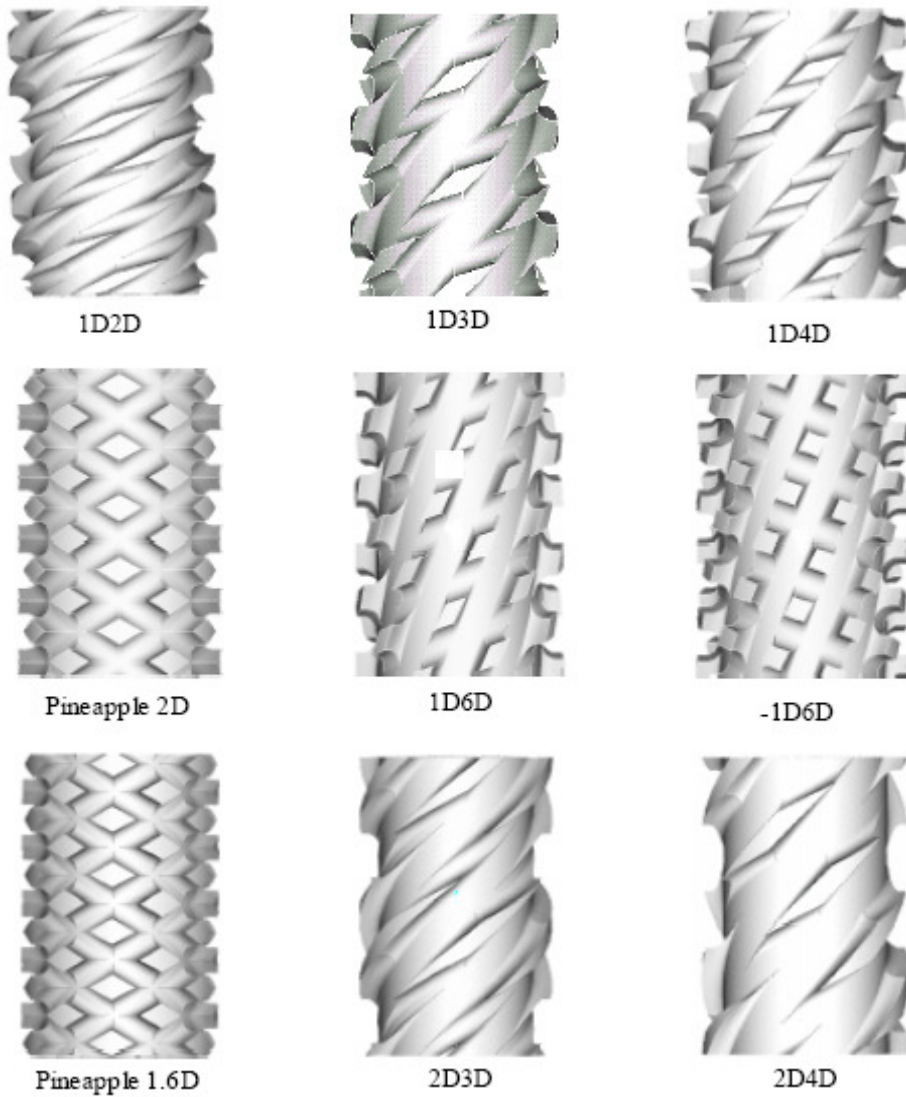
RAUWENDAAL, 1998, 89

#### 4.5. MEZCLADORES DE ROMBOIDES

Los mezcladores con sección romboidal son muy utilizados para proporcionar un tipo de mezcla distributiva. Comúnmente son usados varios diseños diferentes, ver ilustración 12, pero los detalles del comportamiento del flujo y la eficacia de la mezcla no es bien entendida. Esta información es necesaria para poder diseñar y encontrar la geometría rómbica más eficiente, comparando diferentes variables como la eficacia que de la mezcla, la presión y el consumo de energía. En una investigación realizada en el Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho (ICIP), se concluye que las secciones de mezcla distributivas más eficaces eran aquellas con romboides simétricos (el mezclador de piña). Sin

embargo, este tipo de sección es la que consume mayor presión en el proceso de extrusión. También se concluye que las secciones de mezcla romboidales deforman el material por esfuerzo cortante, por lo tanto son mezcladores con bajo poder dispersivo.

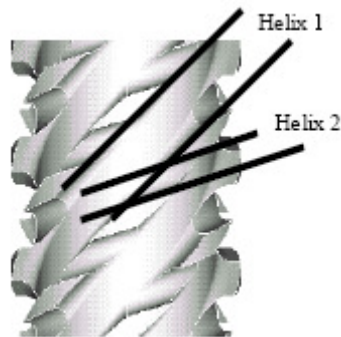
Ilustración 12. Geometrías de mezcladores de romboides



RIOS, 2000, 93

Este dispositivo de mezcla puede tener numerosas configuraciones dependiendo del número y la distancia entre los cortes helicoidales. La ilustración 13 muestra los cortes helicoidales y otros parámetros usados en la construcción rómbica. El funcionamiento de la sección de mezcla romboidal depende completamente del tipo de configuración para ser usado. Por lo tanto, una comparación de varios diseños es deseada para obtener la geometría más eficiente.

Ilustración 13. Parámetros geométricos en el diseño de un mezclador romboidal



RIOS, 2000, 92

#### 4.6. COMPARATIVO ENTRE MEZCLADORES DISTRIBUTIVOS

Basado en las características más importantes, se pueden compilar varios mezcladores distributivos y clasificarlos de acuerdo a su desempeño con respecto a diferentes criterios.

Para la clasificación y comparación que se muestra a continuación en la ilustración 14, cinco es muy bueno y uno es muy malo

La última columna contiene la clasificación del parámetro más importante en cuanto a la efectividad de este tipo de mezcladores.

Ilustración 14. Tabla comparativa entre mezcladores distributivos

MEZCLADOR	CAIDA DE PRESIÓN	ESTANCAMIENTO	LIMPIEZA	FACILIDAD INSTALACIÓN	COSTO DE FABRICACIÓN	ESFUERZO CORTANTE	FRACTURA Y REORIENTACIÓN
Pines	2	2	3	4	5	2	4
Dulmage	4	4	2	4	4	4	5
Saxton	4	4	5	4	4	4	5
CTM	1	3	2	1	1	4	5
De Anillo	1	3	4	3	3	4	5
Axon	4	4	4	4	5	4	3
Doble Onda	4	4	4	4	2	4	2
Pulsar	4	4	4	4	3	3	2
Strata Blend	4	3	4	4	3	3	2

RAUWENDAAL, 1998, 90

## 5. MEZCLADORES DISPERSIVOS

Las siguientes características son deseables para este tipo de mezcladores:

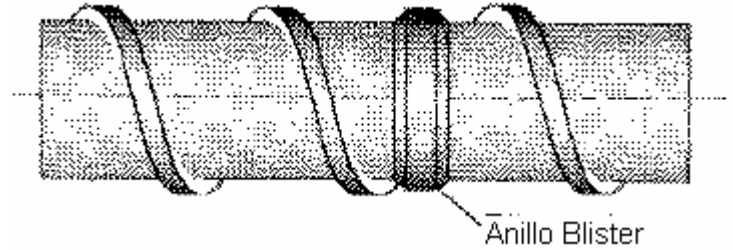
- El mezclador debe tener una región donde el material este sujeto a un alto valor de esfuerzo, preferiblemente esfuerzo de elongación
- La región donde se somete el material a un alto valor de esfuerzo, debe ser diseñada de manera que sea corta, mientras la exposición al esfuerzo de elongación es maximizada.
- Todos los elementos del fluido deben pasar a través de las regiones de esfuerzo muchas veces para alcanzar una efectiva acción de mezclado dispersivo.
- Todos los elementos del fluido deben pasar a través de las regiones de esfuerzo el mismo número de veces para lograr un mezclado uniforme.

Los mezcladores dispersivos pueden dividirse en varios grupos principales: Mezcladores de Anillo Blister, estriados, de engranajes, y CRD (RAUWENDAAL, Op cit., 90)

### 5.1. MEZCLADOR DE ANILLO BLISTER

El anillo Blister es simplemente una abrazadera circunferencial en el tornillo con un una pequeña separación entre el barril y el anillo. Todo el material tiene que fluir a través de la pequeña separación donde es expuesto a altos valores de esfuerzo cortante. Debido a que no se generan flujos de arrastre en el anillo, se generan zonas de alta presión alrededor de él. Los niveles de esfuerzo en la separación no son uniformes, por lo tanto la acción de mezcla tampoco lo es. Ver Ilustración 15. (PLASTICS TERMS@, 2007)

Ilustración 15. Mezclador anillo Blister



RAUWENDAAL, 1998, 89

## 5.2. MEZCLADORES DE ESTRÍAS

Estos mezcladores poseen estrías separadas por unas barreras en forma de aletas. Para que el material pueda salir del mezclador tiene que pasar a través de una estrecha separación entre las barreras; es allí donde el proceso de mezclado es realizado. Uno de los primeros mezcladores de este tipo fue el mezclador Egan desarrollado por Gregory and Street. Las estrías en el mezclador tienen una orientación helicoidal. Ver Ilustración 16. (RAUWENDAAL, Op cit., 91)

Ilustración 16. Mezclador Egan

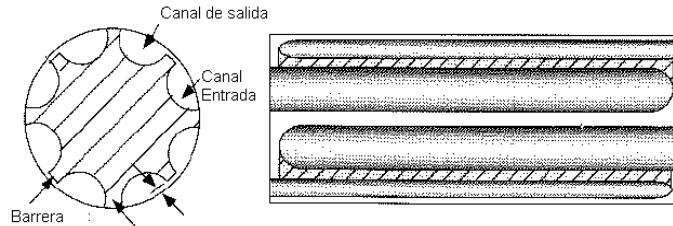


RAUWENDAAL, 1998, 91

Otro tipo de mezclador estriado es el mezclador Union Carbide desarrollado por LeRoy y popularizado por Maddock. Este mezclador tiene estrías rectas ubicadas longitudinalmente como se muestra en la figura. Ver ilustración 17.

(RAUWENDAAL, Ibid., 91)

### Ilustración 17. Mezclador LeRoy



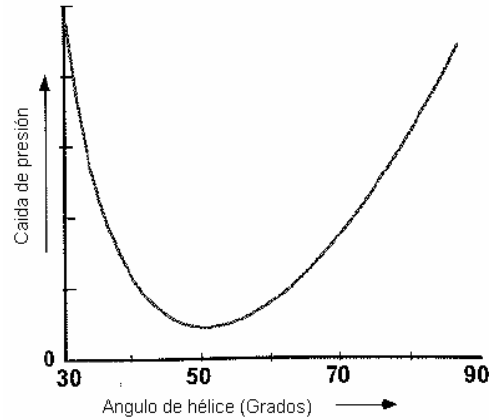
RAUWENDAAL, 1998, 91

Debido a la geometría de las estrías, el mezclador LeRoy no tiene la capacidad de generar un bombeo hacia delante generando una alta caída de presión. Típicamente es fabricado con una fresa con punta de bola; como resultado, las estrías tienen una sección semicircular. Esto provoca ineficiencias en el flujo a la entrada y a la salida de las estrías. Este tipo de mezclador es probablemente el más usado en el mezclado en extrusoras monohusillo. (RAUWENDAAL, Ibid., 91)

Es importante al diseñar secciones de mezclado que estas tengan una baja caída de presión; esto es particularmente cierto para los mezcladores dispersivos. Una alta caída de presión reduce la salida de material, incrementa las temperaturas del material fundido, el tiempo de residencia y la posibilidad de degradación. (RAUWENDAAL, Ibid., 91)

Las altas temperaturas reducen la viscosidad y el esfuerzo en la sección de mezclado del material fundido. Como resultado las altas temperaturas reducen el efecto de mezclado dispersivo. El efecto del ángulo de hélice en la caída de presión se ilustra gráficamente en la siguiente ilustración. Ver ilustración 18. (RAUWENDAAL, Ibid., 92)

Ilustración 18. Variación de la presión con el ángulo de hélice

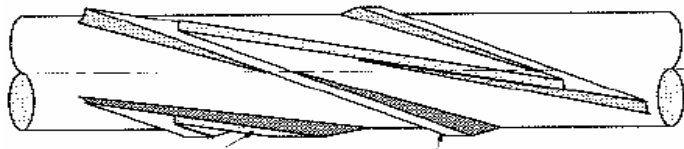


RAUWENDAAL, 1998, .P92

La figura muestra que las grandes variaciones en el ángulo de hélice afectan considerablemente la caída de presión. Es claro que para un ángulo de hélice de 90° (mezclador LeRoy o Maddock), o de 30° (mezclador Egan) no son una buena elección debido a que generan grandes caídas de presión. El ángulo de hélice óptimo es alrededor de 50°. Para fluidos no Newtonianos este ángulo es menor de 50°. El ángulo de hélice óptimo depende del comportamiento del fluido no Newtoniano. Para los plásticos comunes el ángulo más apropiado se encuentra alrededor de 45°. (RAUWENDAAL, Ibid., 92)

Otro mezclador de estrías es el tipo Zorro desarrollado por Migrandy Corporation. Ver ilustración 19. (PATENT STORM@, 2007)

Ilustración 19. Mezclador tipo Zorro

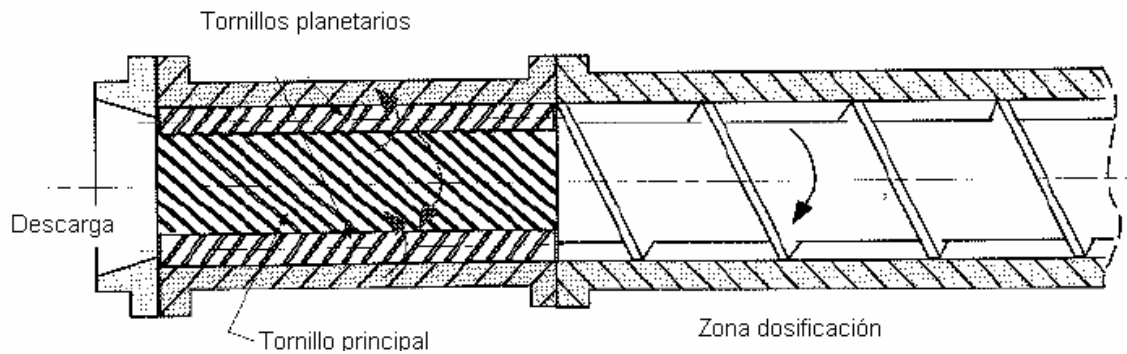


RAUWENDAAL, 1998, 93

### 5.3. MEZCLADORES DE ENGRANAJES

Este tipo de mezcladores tienen seis o más tornillos planetarios que giran alrededor del tornillo principal. La geometría del barril planetario debe tener surcos helicoidales correspondientes a las aletas helicoidales de los tornillos planetarios. Es necesario aclarar que en este mezclador el barril del tornillo de la extrusora es diferente a barril del mezclador tal y como se muestra en la figura. Ver Ilustración 20. (PATENT STORM@, 2007)

Ilustración 20. Mezclador de engranajes



RAUWENDAAL, 1998, 93

Este tipo de mezcladores son comúnmente empleados en Europa, y no se usan mucho en los Estados Unidos. Algunos de los beneficios de los mezcladores de engranajes son:

- Buen nivel de homogenización del material fundido a una baja temperatura.
- Uniformidad en los esfuerzos a los que está sometido el material.
- Alto caudal de salida por revolución del tornillo.
- Bajo costo de producción por unidad de rendimiento.
- Poseen una acción de auto limpieza, lo que facilita el cambio de material.

- Buena capacidad de mezclado distributivo y dispersivo de diferentes tipos de aditivos.

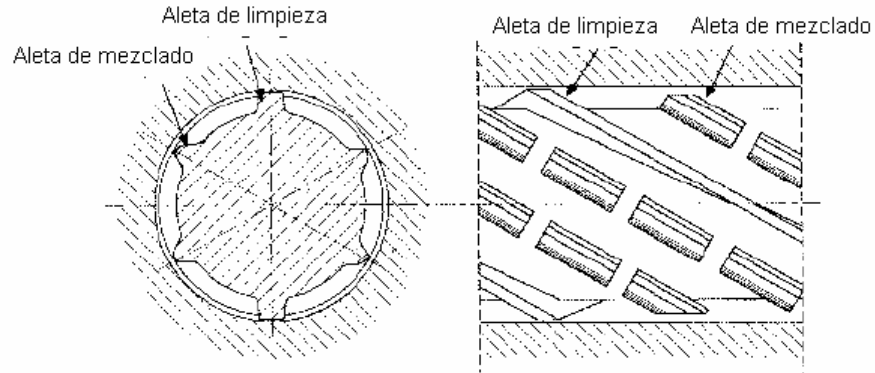
Estas características hacen que este tipo de mezclador sea comúnmente empleado para el procesamiento de materiales muy sensibles al calor, como el PVC rígido y flexible. También son utilizados para procesar mezclas de PVC y ABS, materiales en polvo, epóxicos, poliéster, acrílicos, poliuretanos, entre otros. (RAUWENDAAL, Op cit., 93)

#### 5.4. MEZCLADOR CRD

Los mezcladores dispersivos actualmente tienen dos desventajas importantes. La primera es que dependen más del esfuerzo cortante que del esfuerzo de elongación. La segunda es que el material pasa solo una vez por la zona de alto valor de esfuerzo. La nueva tecnología de mezcladores desarrollada por Rauwendaal, elimina estas desventajas. El mezclador CRD usa un perfil de empuje inclinado para crear una región en forma de cuña. Dicha región crea un fuerte flujo de elongación. El mezclador CRD también utiliza múltiples aletas de mezclado con una de mayor longitud con el fin asegurar que los componentes del fluido pasen por la zona de alto esfuerzo varias veces. (RAUWENDAAL, Ibid., 94)

Las aletas de mezclado deben tener espaciamiento suficiente entre ellas con el fin de garantizar un alto grado de mezclado dispersivo. Las aletas de limpieza evitan el estancamiento del material a la vez que facilitan el bombeo. Ver Ilustración 21. (RAUWENDAAL, Ibid., 95)

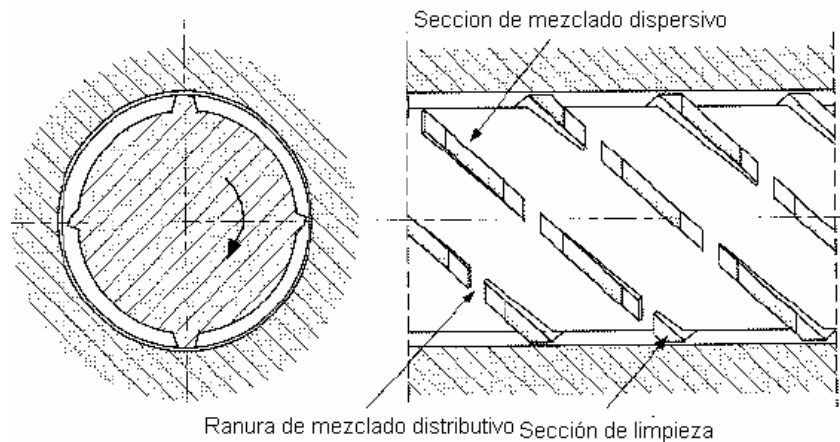
Ilustración 21. Mezclador CRD con separación de aletas de limpieza



RAUWENDAAL, 1998, 95

Las ranuras maquinadas entre las aletas generan eficiencia en el mezclado distributivo y dispersivo permitiendo la distribución aleatoria de los elementos de fluido asegurando que todos los elementos pasan a través de la región de alto valor de esfuerzo. Las aletas de limpieza separadas pueden evitarse incorporando segmentos que limpian a lo largo de las aletas de mezclado como se muestra en la figura. Ver Ilustración 22 (RAUWENDAAL, Ibid., 95)

Ilustración 22. CRD con segmentos de limpieza en aletas de mezclado



RAUWENDAAL, 1998, 95

Las ventajas del mezclador CRD es su facilidad de fabricación, su bajo costo y además permite alcanzar un mezclado dispersivo tan bueno como una extrusora de doble husillo. (RAUWENDAAL, Ibid., 96)

### 5.5. COMPARATIVO ENTRE MEZCLADORES DISPERSIVOS

Basado en las características más importantes, se pueden compilar varios mezcladores dispersivos y clasificarlos de acuerdo a su desempeño con respecto a diferentes criterios.

Para la siguiente clasificación, cinco es muy bueno y uno es muy malo. Ver Ilustración 23.

Ilustración 23. Tabla comparativa entre mezcladores dispersivos

MEZCLADOR	CAIDA DE PRESIÓN	ESTANCAMIENTO	LIMPIEZA	COSTO DE FABRICACIÓN	NUMERO DE PASOS	TIPO DE FLUJO
Blister	1	3	2	5	1	Cortante
Egan	2	5	5	4	1	Cortante
LeRoy	2	2	5	4	1	Cortante
Zorro	5	5	5	3	1	Cortante
Leroy Helicoidal	5	5	5	4	1	Cortante
Engranajes	3	5	5	2	Múltiple	Cortante
CRD	5	5	5	4	Múltiple	Elongación

RAUWENDAAL, 1998, 96

## 6. DEFINICIÓN VARIABLES DE MODELACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN

No se conocen normas específicas sobre los parámetros y variables relacionadas con los mezcladores. A continuación se mencionan los parámetros de modelación y parametrización que son utilizados para el desarrollo de la aplicación

### 6.1. MEZCLADOR DE ANILLO BLISTER

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario

Longitud Mezclador: Definida por el usuario

Profundidad del Canal: Definido por el usuario

Espesor del anillo: Definido por el usuario

Ubicación del anillo: Parte central del mezclador

Paso de la hélice: Equivalente al diámetro.

Ángulo de hélice =  $17.65^\circ$  (Paso Cuadrado)

Espesor perfil hélice =  $0.1 \cdot \text{Diámetro}$

### 6.2. MEZCLADOR AXON

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario

Longitud Mezclador: Definida por el usuario

Profundidad del Canal: Definido por el usuario

Espesor de la ranura (Perfil de corte): Definido por el usuario

Paso de la hélice: Equivalente al diámetro.

Ángulo de hélice =  $17.65^\circ$  (Paso Cuadrado)

Espesor perfil hélice =  $0.1 \cdot \text{Diámetro}$

### 6.3. MEZCLADOR DE PINES

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario

Longitud Mezclador: Definida por el usuario

Profundidad del Canal (Altura Pines): Definido por el usuario

Cantidad de Pines: Definida por el usuario

Cantidad de anillos: Definida por el usuario

Ubicación del primer anillo:  $(\text{Longitud}/(\text{Cantidad de Anillos}+1))-\text{Espesor hélice}/2$

Paso de la hélice: Equivalente al diámetro.

Ángulo de hélice =  $17.65^\circ$  (Paso Cuadrado)

Espesor perfil hélice =  $0.1 \cdot \text{Diámetro}$

Espesor Pin = Espesor hélice

### 6.4. MEZCLADOR DE ROMBOIDES

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario

Longitud Mezclador: Definida por el usuario

Paso hélice 1: Definido por el usuario

Paso hélice 2: Definido por el usuario

Profundidad del Canal: Definida por el usuario

Cantidad de repeticiones hélice 1: Definida por el usuario

Cantidad de repeticiones hélice 2: Definida por el usuario

Espesor del perfil hélice 1: Definido por el usuario

Espesor del perfil hélice 2: Definido por el usuario

### 6.5. MEZCLADOR DULMAGE

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario

Longitud Mezclador: Definida por el usuario

Profundidad del Canal: Definida por el usuario  
Cantidad de aletas: Definida por el usuario  
Espesor corte circunferencial: Definido por el usuario  
Cantidad de repeticiones corte circunferencial: Definida por el usuario  
Ángulo de hélice =  $17.65^\circ$  (Paso Cuadrado)  
Espesor =  $0.1 \cdot \text{Diámetro}$   
Espesor Aleta =  $\text{Espesor}/2$   
Paso hélice Aleta =  $\text{Longitud} * 2$   
Ubicación del primer corte:  $\text{Longitud}/(\text{Cantidad repeticiones}+1)$

#### 6.6. MEZCLADOR DOUBLE WAVE

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario  
Longitud Mezclador: Definida por el usuario  
Profundidad del Canal (Onda 1): Definida por el usuario  
Profundidad del Canal (Onda 2):  $2 * \text{Profundidad Onda 1}$   
Paso: Definido por el usuario  
Ángulo de hélice =  $17.65^\circ$  (Paso Cuadrado)  
Espesor =  $0.1 \cdot \text{Diámetro}$   
Espesor perfil de corte:  $\text{Paso} - \text{Espesor}$

#### 6.7. MEZCLADOR EGAN

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario  
Longitud Mezclador: Definida por el usuario  
Profundidad del Canal: Definida por el usuario  
Cantidad de Canales: Definida por el usuario  
Paso hélice del canal:  $\text{Longitud} * 2$   
Ángulo de hélice =  $17.65^\circ$  (Paso Cuadrado)

Espesor =  $0.1 \cdot \text{Diámetro}$

Espesor perfil aletas del canal:  $\text{Espesor}/2$

Altura de corte de la barrera:  $\text{Profundidad canal}/4$

#### 6.8. MEZCLADOR MADDOCK

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario

Longitud Mezclador: Definida por el usuario

Radio de Canal: Definido por el usuario

Ángulo entre Canales: Definido por el usuario

Coordenada X canal (Segundo Canal):  $\text{Sen}(\text{Ángulo entre canales}) \cdot \text{Radio canal}$

Coordenada Y canal (Segundo Canal):  $\text{Cos}(\text{Ángulo entre canales}) \cdot \text{Radio canal}$

Longitud Canal:  $\text{Longitud} - 2 \cdot \text{Radio Canal}$

Altura de corte de la barrera:  $\text{Radio de Canal}/3$

#### 6.9. MEZCLADOR SAXTON

Diámetro Mezclador: Definido por el usuario

Longitud Mezclador: Definida por el usuario

Profundidad del Canal: Definida por el usuario

Cantidad de aletas: Definida por el usuario

Espesor perfil corte: Definido por el usuario

Paso hélice perfil corte: Definido por el usuario

Ángulo de hélice =  $17.65^\circ$  (Paso Cuadrado)

Espesor =  $0.1 \cdot \text{Diámetro}$

Espesor Aleta =  $\text{Espesor}/2$

Paso hélice Aleta =  $\text{Longitud} \cdot 2$

## 7. SOFTWARE UTILIZADO PARA EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

Para la modelación paramétrica de mezcladores para extrusión de termoplásticos, se utiliza un software especializado en diseño mecánico que permite modelar complejas geometrías en 3D, llamado SolidWorks 2007 en su versión educativa.

Esta poderosa herramienta con la cual se pueden diseñar piezas y ensambles de manera muy versátil fue escogida, entre muchas otras opciones, debido a dos razones principales;

El primer motivo es porque SolidWorks 2007 ofrece la posibilidad de ser programado a través de una herramienta denominada API (Application Programming Interface), la cual no es más que una interfaz de programación para dicho software que contiene cientos de funciones que pueden invocarse desde Visual Basic (VB) y Visual Basic for Applications (VBA), proporcionando al usuario un acceso directo a las funcionalidades de SolidWorks mediante el uso de macros.

La segunda razón es debido a que el presente trabajo es la continuación de proyectos anteriores titulados “Modelación paramétrica y manufactura de tornillos para extrusión de termoplásticos utilizando sistemas CAD-CAM-CAE” y “Aplicación de una herramienta de ingeniería asistida por computador para el análisis unidimensional de tornillos de extrusión de termoplásticos”, los cuales fueron desarrollados bajo esta plataforma.

## 8. FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN “MIXERS MODELING”

La aplicación “Mixers Modeling” se desarrolla para trabajar dentro de la plataforma SolidWorks 2007, con el fin de mantener la compatibilidad con los proyectos realizados en años anteriores relacionados con la modelación y el análisis de tornillos para la extrusión de termoplásticos.

Para el manejo de dicho software se parte del supuesto que el usuario conoce perfectamente la geometría del tipo de mezclador que desea modelar, ya que la estructura del programa no cuenta con un algoritmo de cálculo que relacione directa y proporcionalmente algunas variables con otras, tal y como sucede con los tornillos de extrusión, en donde la mayoría de los parámetros dimensionales se encuentran relacionados en función del diámetro.

### 8.1. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL SISTEMA

Para garantizar un adecuado funcionamiento de la aplicación “Mixers Modeling”, se debe cumplir con unos requerimientos mínimos debido a que la ejecución de los códigos en Visual Basic que generan la geometría de los mezcladores necesita de unas características determinadas de memoria, procesador y tarjeta de video. Dichos requerimientos se mencionan a continuación:

- El sistema operativo Microsoft Windows XP ó Vista.
- SolidWorks 2007, versión educativa ó comercial.
- Procesador Pentium 4 ó AMD Athlon 64.
- Mínimo 256 Mb de memoria RAM.
- Pantalla SVGA.

## 8.2. INSTALACIÓN

El software para la modelación paramétrica de mezcladores para extrusión de polímeros termoplásticos “Mixers Modeling” se encuentra en el CD anexo a este trabajo. Para su instalación, solo se debe introducir el CD, copiar la carpeta llamada “Mixers Modeling” y pegarla en el disco C. Al interior de esta carpeta se encuentra un archivo ejecutable llamado “Mixers Modeling.exe” tal y como lo muestra la ilustración 24. Se sugiere al usuario crear un acceso directo en el escritorio para un fácil y rápido acceso al programa.

Ilustración 24. Icono de la aplicación



Elaboración propia

Para dar inicio a la aplicación, basta con hacer doble clic en el icono ejecutable mencionado anteriormente. Para un mejor desempeño del software, se recomienda al usuario abrir una parte nueva en SolidWorks. Sin embargo no es un requerimiento necesario debido a que el programa es capaz de abrir el SolidWorks automáticamente si este se encuentra instalado en el disco C; de lo contrario el usuario tendrá que abrir el programa y crear una nueva parte por si mismo. La carpeta Mixers Modeling debe ser instalada en el disco C, de lo contrario el programa no encontrará la ruta para guardar la parte modelada y generar el plano respectivo.

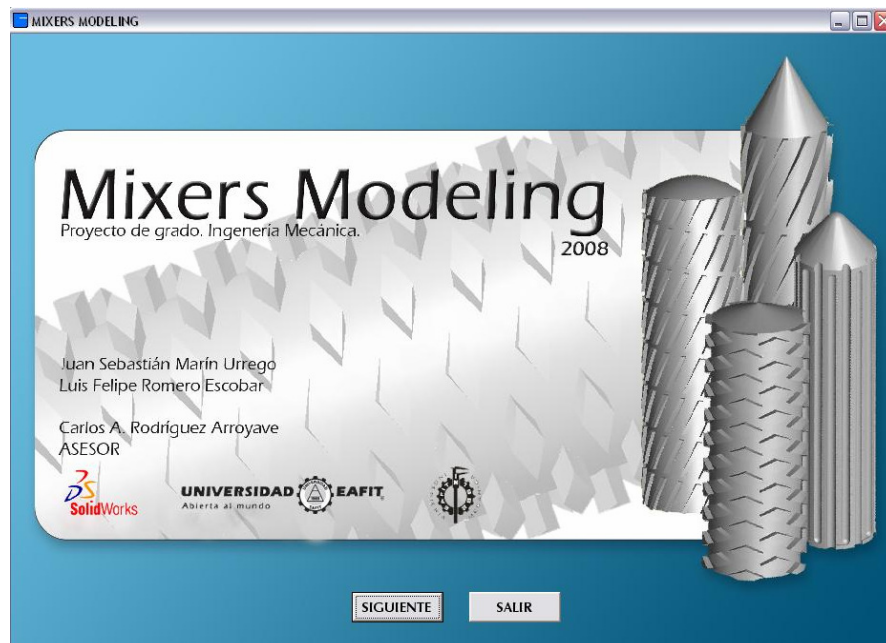
Los archivos de las modelaciones serán guardados en la siguiente ruta: C:\Mixers Modeling\Partes.

### 8.3. EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN “MIXERS MODELING”

Cuando se ejecuta el programa, aparece una ventana de bienvenida en la cual se hace una presentación de la aplicación, sus autores y el asesor del presente proyecto de grado. Ver ilustración 25

En esta ventana se encuentran dos botones; el primero es “siguiente” el cual brinda la posibilidad de abrir una nueva ventana que más adelante se conocerá con el nombre de “opciones”, mediante la cual se puede elegir el tipo de mezclador que se quiere modelar. El segundo botón es “salir”, el cual cierra por completo la aplicación. Este botón forma parte de todas las ventanas del programa para que el usuario pueda dar por terminada la ejecución de la aplicación en el momento en que sea requerido.

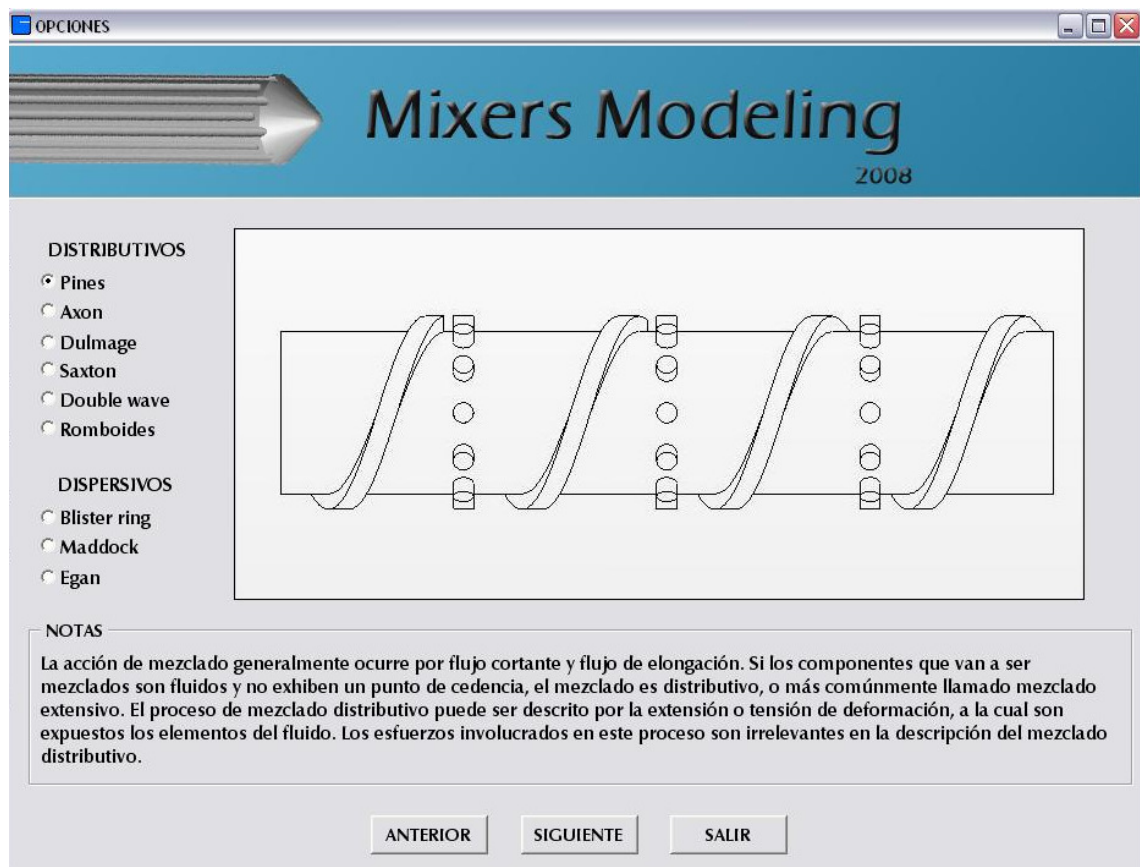
Ilustración 25. Pantalla de presentación



Elaboración propia

Luego de presionar el botón “siguiente”, se cierra la ventana de bienvenida e inmediatamente se abre una nueva que permite al usuario seleccionar el tipo de mezclador. Estos elementos se encuentran clasificados en dos grupos; distributivos y dispersivos. Entre los mezcladores distributivos se pueden encontrar; el mezclador de pines, mezclador Axon, mezclador Dulmage, mezclador Saxton, mezclador Double Wave y el mezclador de romboides. En los de tipo dispersivo se pueden encontrar; el mezclador de anillo Blister, mezclador Maddock y el mezclador Egan. Ver ilustración 26

Ilustración 26. Pantalla de opciones



Elaboración propia

En esta ventana se puede encontrar un recuadro en la parte inferior, en el cual se muestran las principales características del tipo de mezclado (Distributivo o Dispersivo) de acuerdo con el elemento mezclador elegido por el usuario. En la parte derecha de la ventana se muestra la imagen preliminar correspondiente a cada mezclador. Esta imagen que tiene como fin orientar al usuario, cambia de acuerdo a la selección hecha por el mismo.

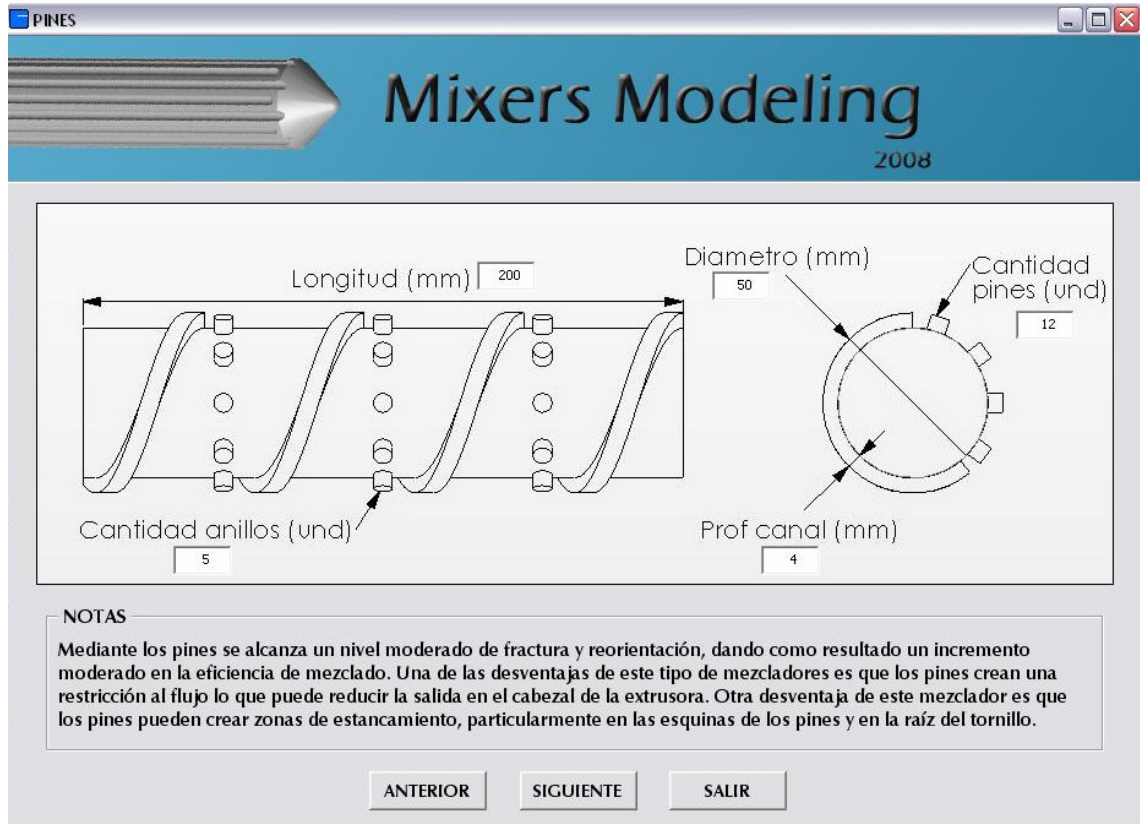
En esta ventana se pueden observar tres botones; “siguiente”, “anterior” y “salir”. Una vez seleccionado el mezclador, se debe presionar el botón “siguiente” para invocar una nueva ventana en la que se ingresan los parámetros geométricos del mezclador seleccionado. El botón “anterior” cierra la ventana actual y abre la inmediatamente anterior, es decir, en este caso la presentación del programa.

En la ventana del mezclador de pines, como en la de todos los demás mezcladores, se muestra un esquema general del elemento mezclador, el cual tiene dos vistas, con el fin de mostrarle al usuario de la forma más clara posible, los parámetros que debe ingresar para modelar el mezclador según sus necesidades.

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador de pines son, ver ilustración 27:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros
- Cantidad de anillos con pines en unidades
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros
- Cantidad de pines por anillo en unidades
- Profundidad del canal, o también puede ser interpretada como la altura de los pines, en milímetros.

Ilustración 27. Pantalla mezclador de pines



Elaboración propia

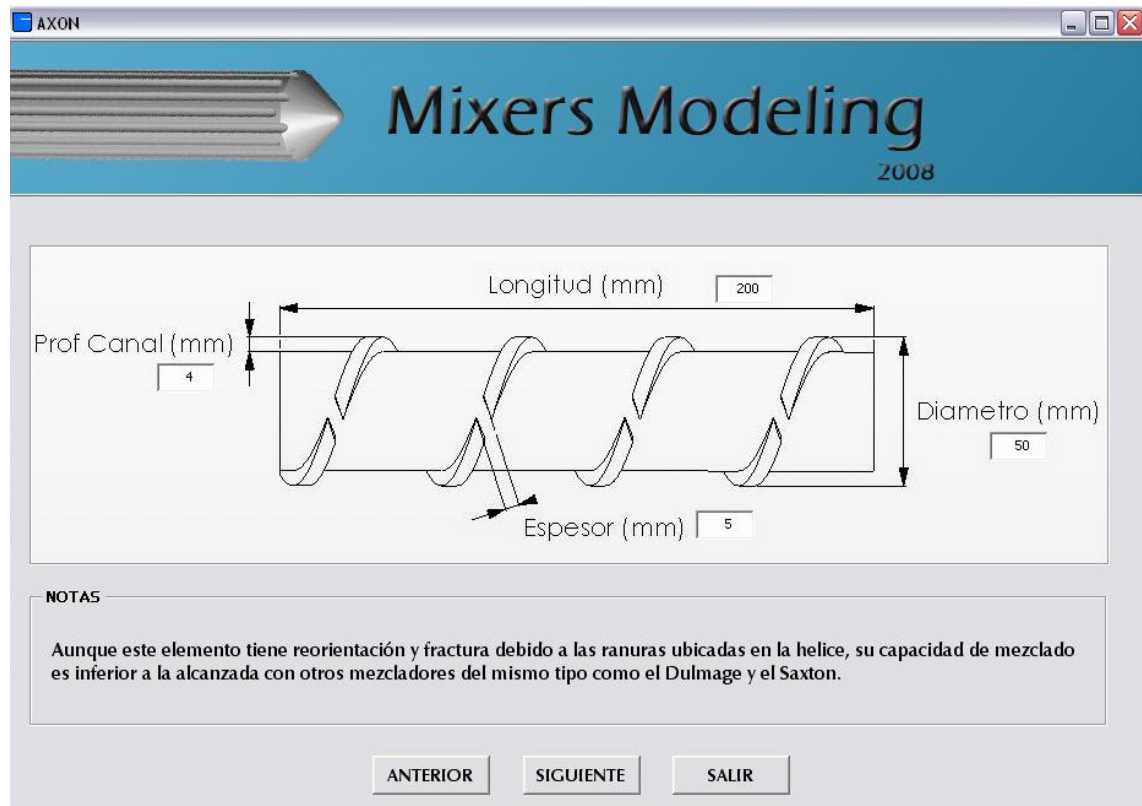
Como se puede observar, cada ventana de los mezcladores tiene notas de interés que traen una pequeña información general acerca del tipo de mezclador que se muestra, y son totalmente ajenas a criterios o normas para el diseño de los mismos.

También se cuenta con el botón "anterior", el cual cierra la ventana actual y abre nuevamente la de opciones.

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador Axon son, ver ilustración 28:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros.
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros.
- Profundidad del canal en milímetros.
- Espesor de las ranuras ubicadas en la hélice en milímetros.

Ilustración 28. Pantalla mezclador Axon

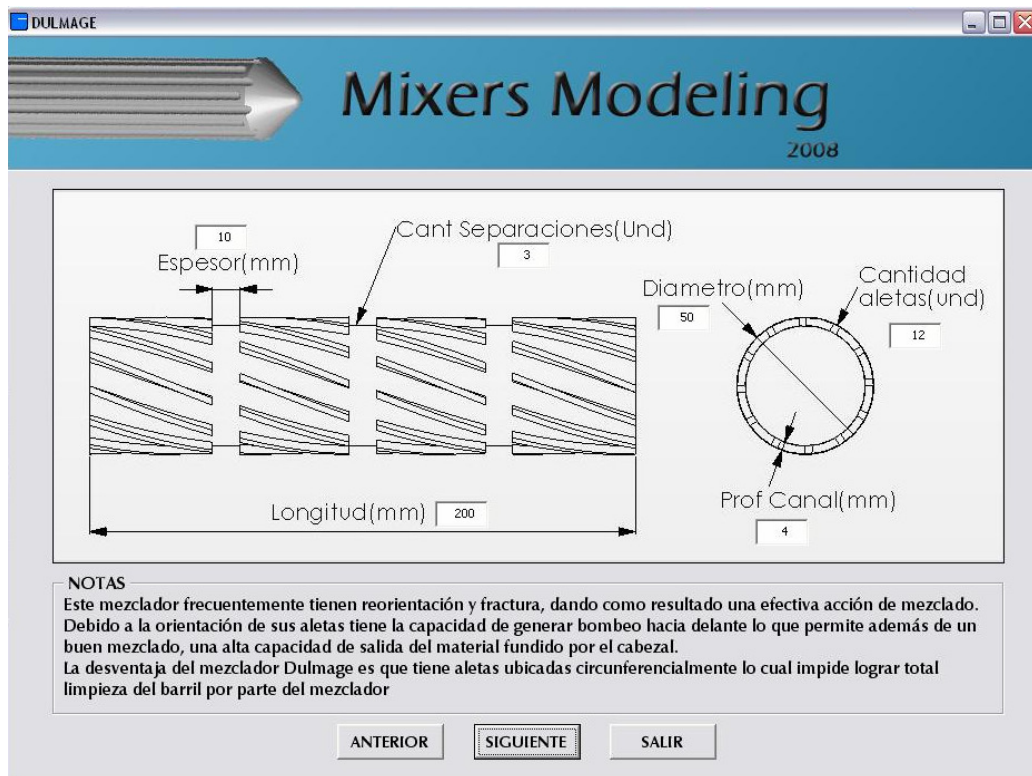


Elaboración propia

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador Dulmage son, ver ilustración 29:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros.
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros.
- Profundidad del canal en milímetros.
- Cantidad de separaciones o ranuras en unidades.
- Espesor de las ranuras en milímetros.
- Cantidad de aletas en el perímetro del mezclador en unidades.

Ilustración 29. Pantalla mezclador Dulmage

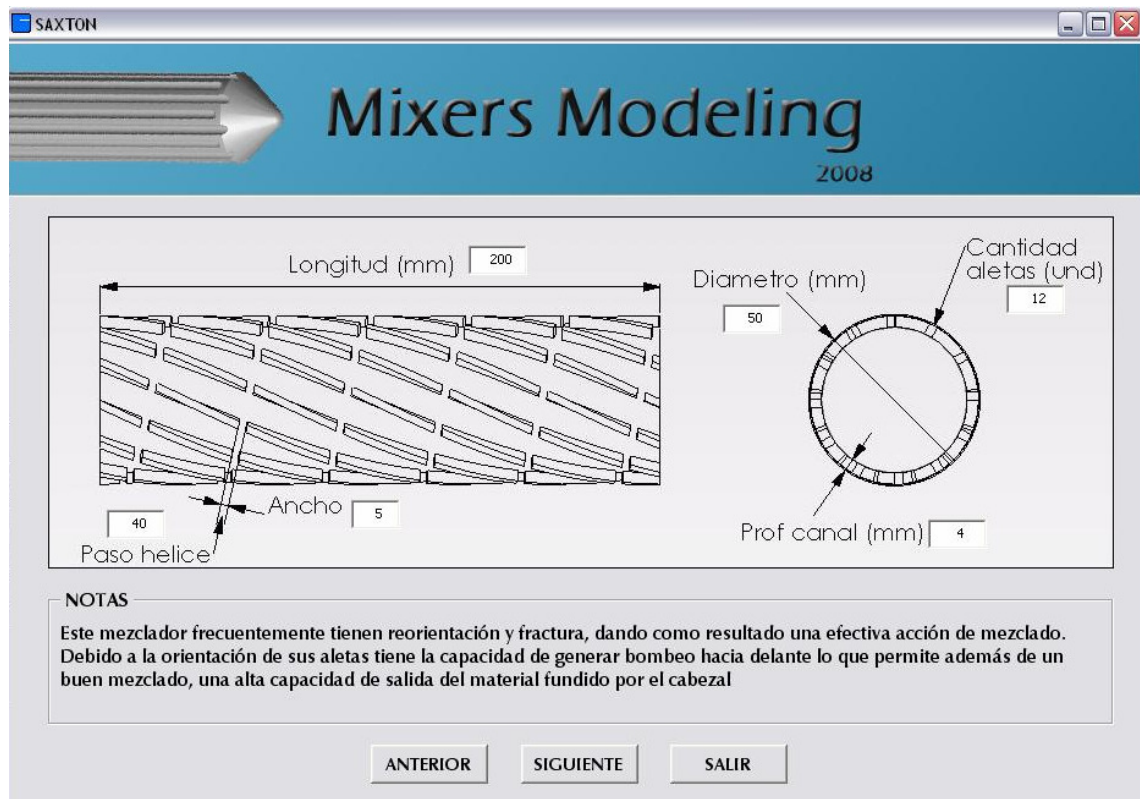


Elaboración propia

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador Saxton son, ver ilustración 30:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros.
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros.
- Profundidad del canal en milímetros.
- Paso de la hélice que forma la ranura en milímetros.
- Espesor o ancho de las ranuras en milímetros.
- Cantidad de aletas en el perímetro del mezclador en unidades.

Ilustración 30. Pantalla mezclador Saxton

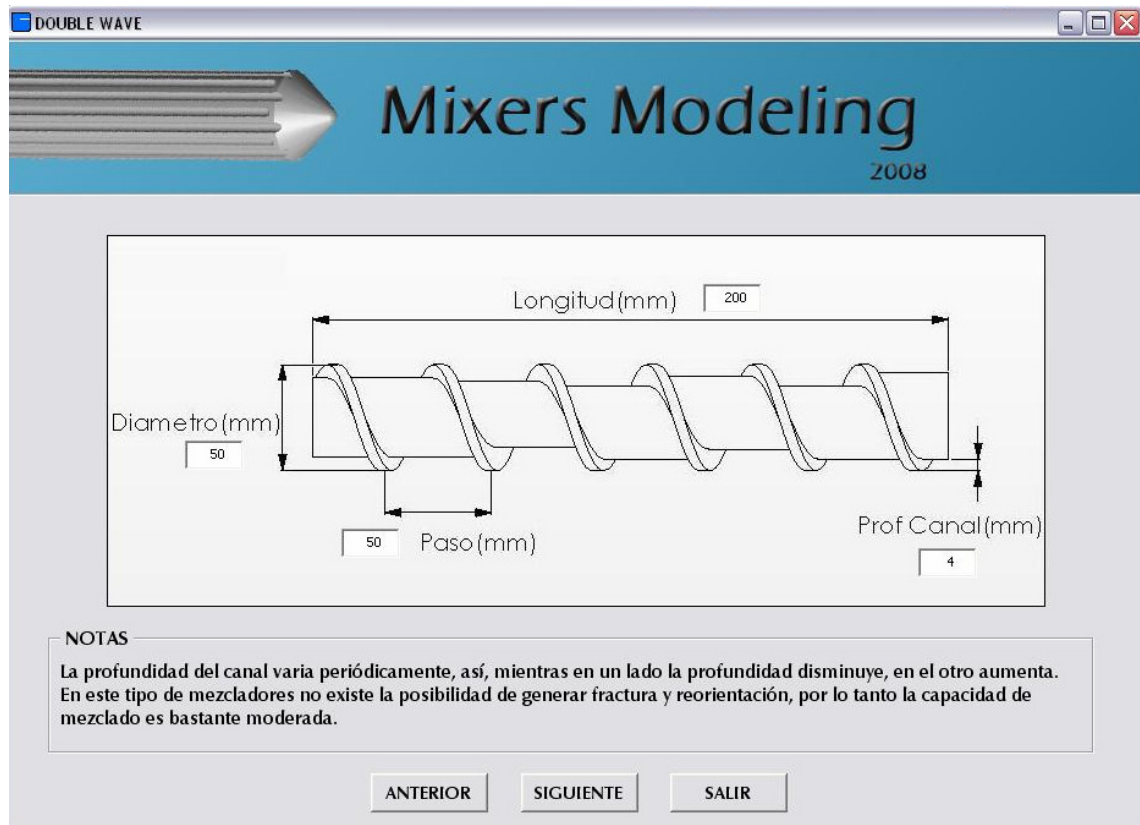


Elaboración propia

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador double wave son, ver ilustración 31:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros.
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros.
- Profundidad del canal en milímetros.
- Paso de la hélice en milímetros.

Ilustración 31. Pantalla mezclador Double Wave

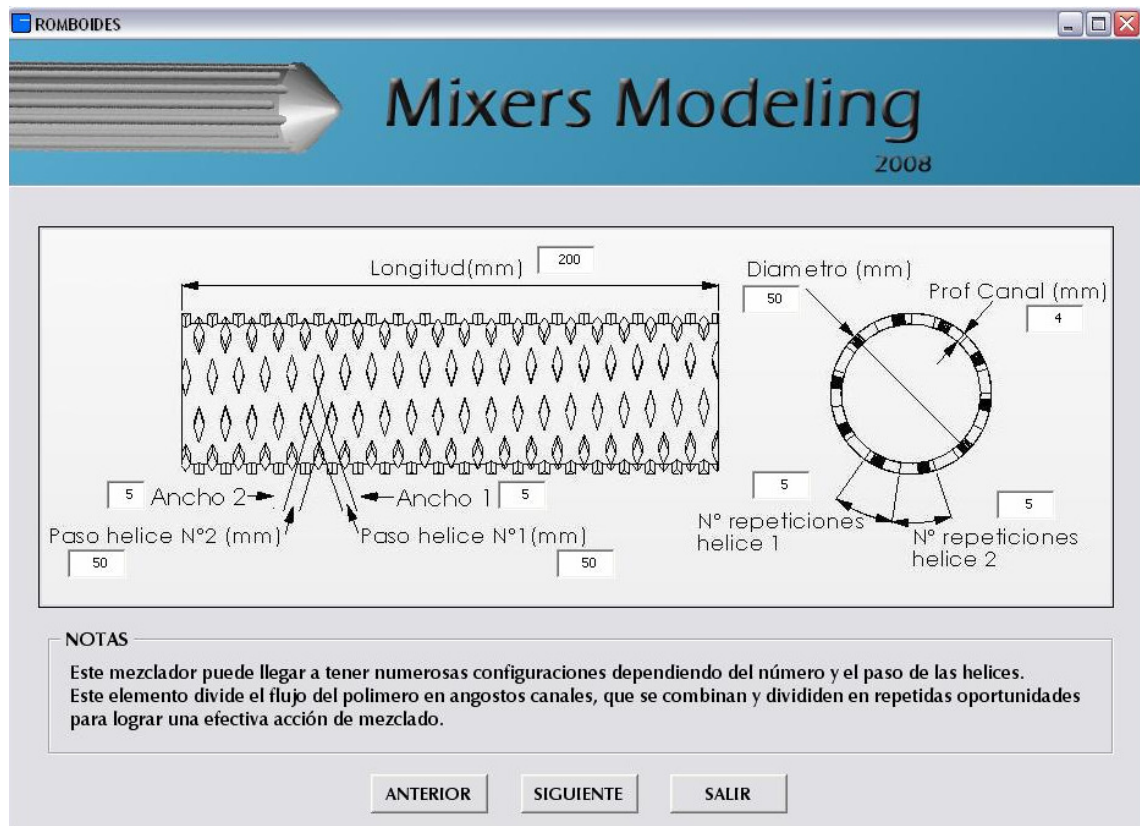


Elaboración propia

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador de romboides son, ver ilustración 32:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros
- Profundidad del canal en milímetros.
- Paso de la hélice N° 1 y N° 2 en milímetros
- Ancho de las ranuras N° 1 y N° 2 en milímetros.
- Cantidad repeticiones de la hélice N° 1 y N° 2 en unidades.

Ilustración 32. Pantalla mezclador de Rombooides

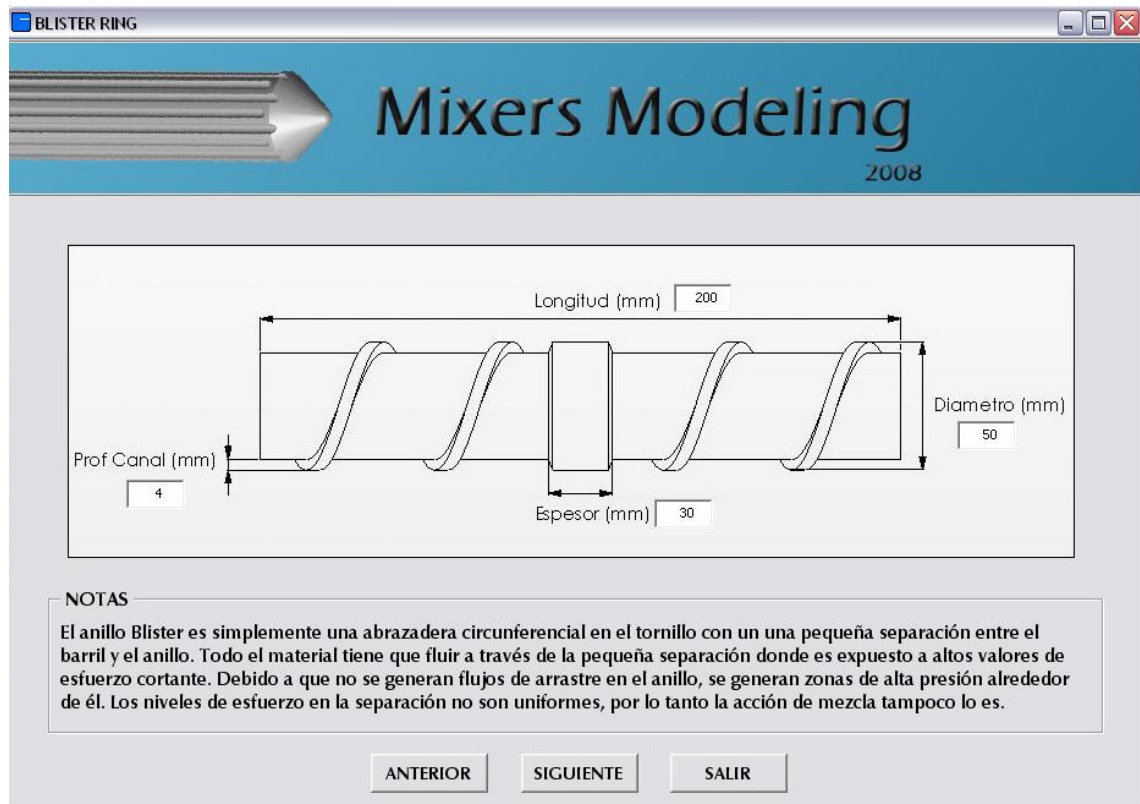


Elaboración propia

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador de anillo Blister son, ver ilustración 33:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros
- Profundidad del canal en milímetros.
- Espesor del anillo en milímetros.

Ilustración 33. Pantalla mezclador Blister Ring

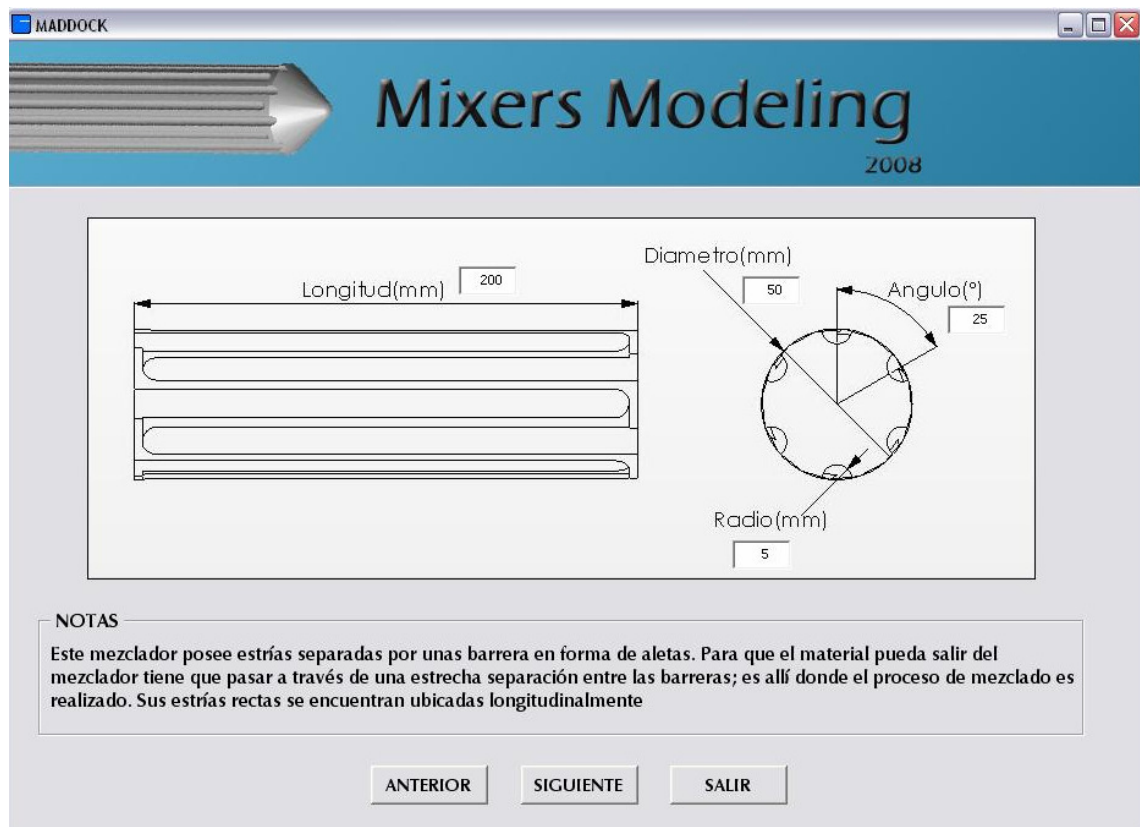


Elaboración propia

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador Maddock son, ver ilustración 34:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros
- Radio de las ranuras longitudinales en milímetros.
- Cantidad de separaciones o ranuras en unidades.
- Ángulo de separación entre las ranuras en grados

Ilustración 34. Pantalla mezclador Maddock

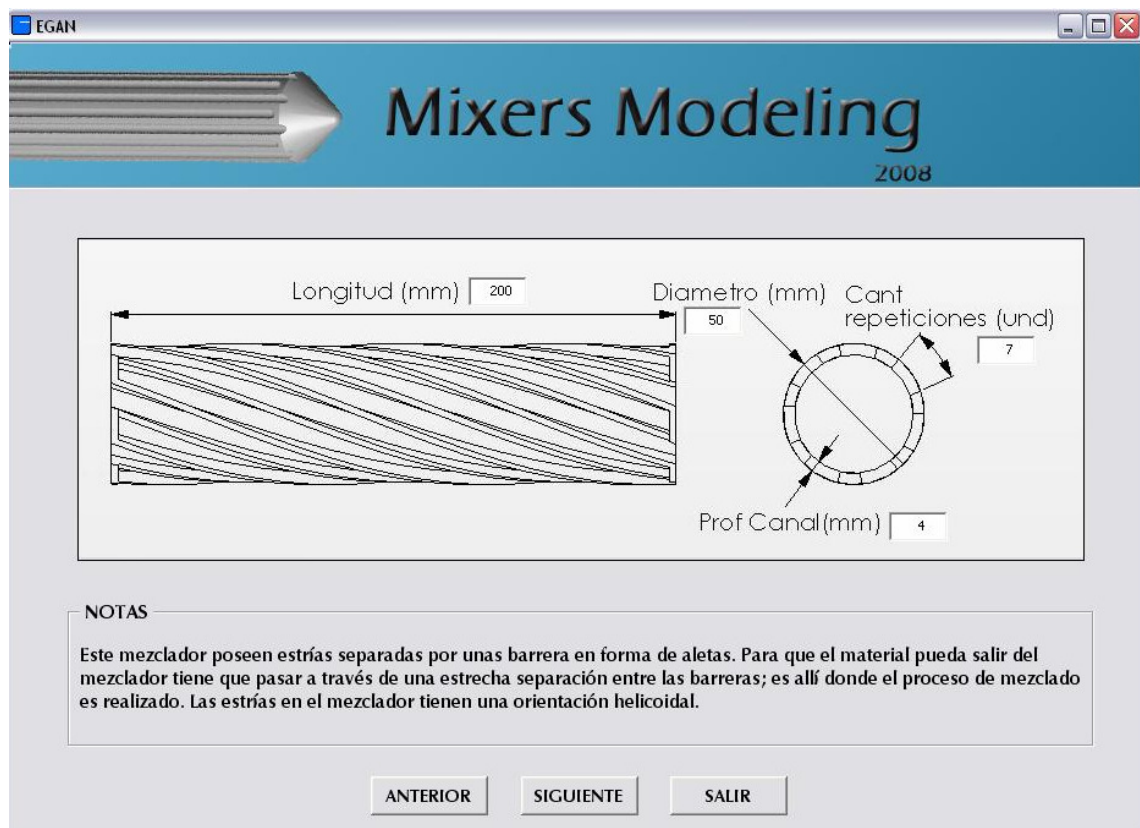


Elaboración propia

Los parámetros geométricos que deben ser ingresados a la aplicación para la modelación del mezclador Egan son, ver ilustración 35:

- Longitud de la zona de mezcla en milímetros
- Diámetro exterior del mezclador en milímetros
- Profundidad del canal en milímetros.
- Cantidad de repeticiones en el perímetro del mezclador en unidades.

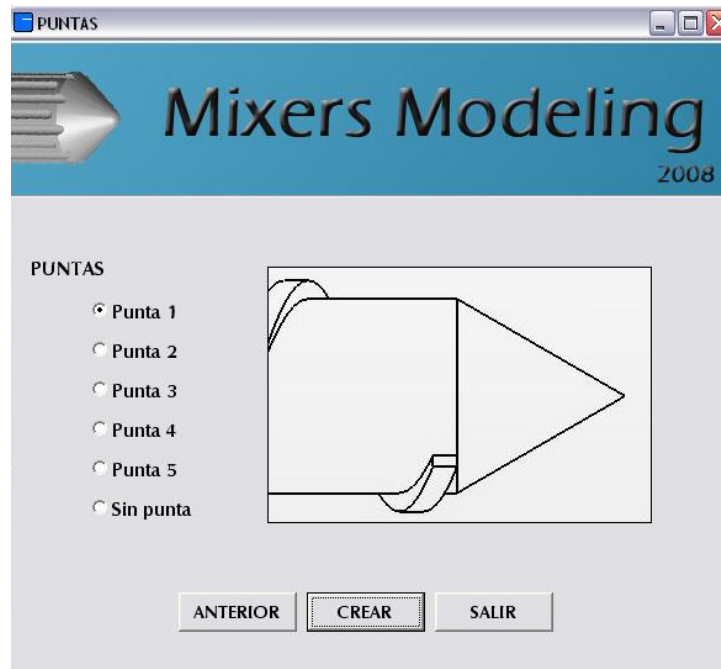
Ilustración 35. Pantalla mezclador Egan



Elaboración propia

Luego de oprimir el botón “siguiente” en cualquiera de las ventanas de los mezcladores, aparece una nueva conocida como “puntas”, mediante la cual el usuario puede elegir entre 5 tipos de puntas, entre las que están; puntas cónicas, esféricas y redondeadas. Ver ilustración 36

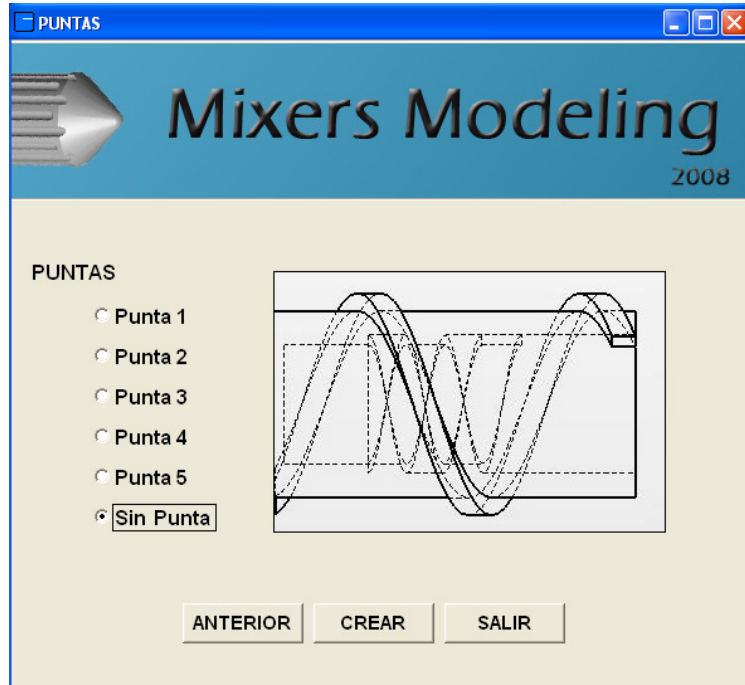
Ilustración 36. Pantalla de puntas



Elaboración propia

También existe la posibilidad de no crearle una determinada punta al mezclador en el caso que el usuario desee combinar y acoplarle otro accesorio. En este caso se modela un tipo de rosca interna que cumple exactamente con las características del sistema de acople diseñado al otro extremo del mezclador. Ver ilustración 37.

Ilustración 37. Pantalla sin punta

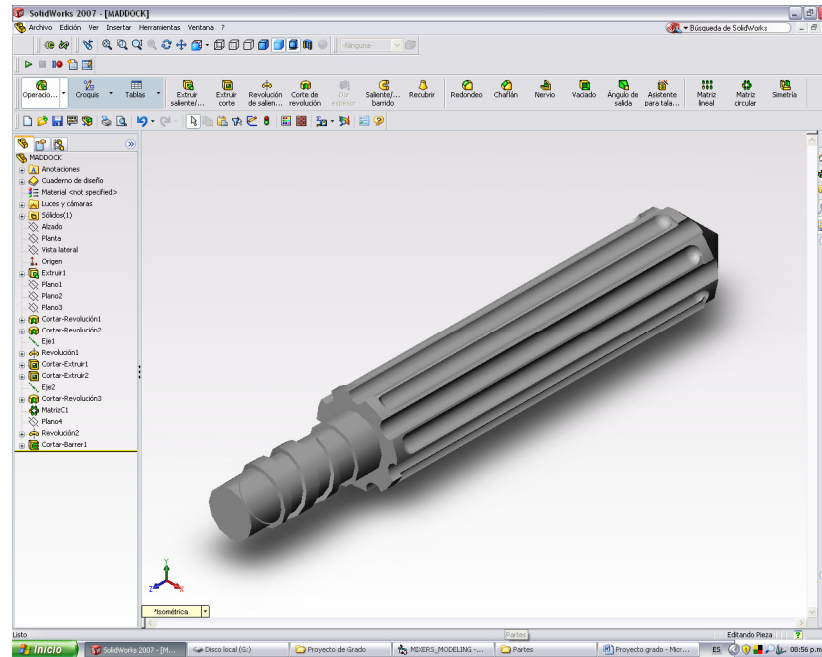


Elaboración propia

Aunque existen muchas posibilidades de acople para este tipo de elementos, para la modelación, la aplicación adopta el sistema de acople utilizado en la extrusora del Instituto del plástico.

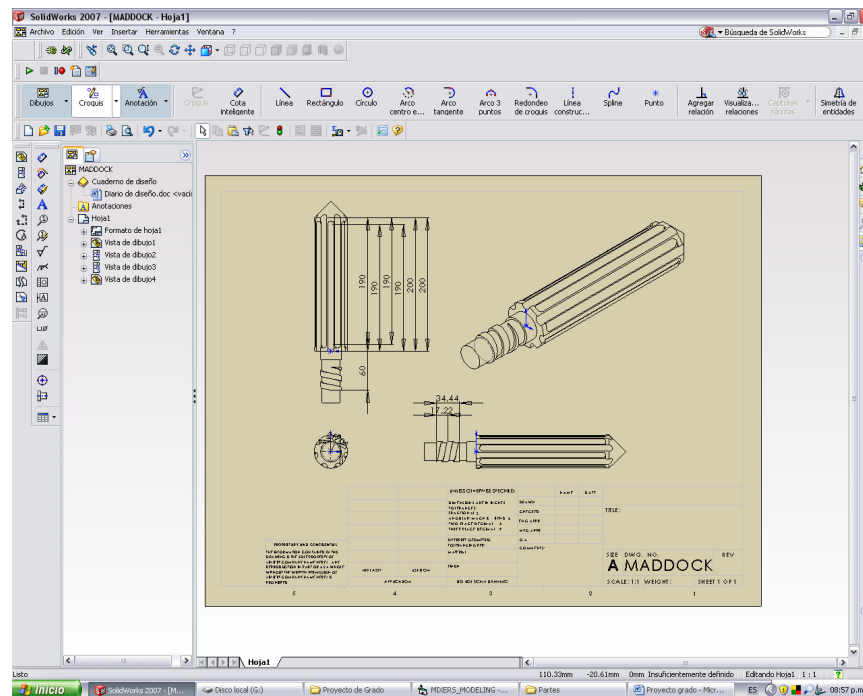
Luego de oprimir el botón crear, el programa procede con la creación y el almacenamiento de la modelación del mezclador con su respectivo plano. Las piezas y los planos serán almacenados con el nombre del mezclador en la carpeta Partes como se mencionó anteriormente. Ver Ilustraciones 38 y 39

Ilustración 38. Modelación mezclador Maddock



Elaboración propia

Ilustración 39. Plano mezclador Maddock



Elaboración propia

## 9. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN

En este capítulo se expone en forma general, la manera como se desarrolla la aplicación para la modelación parametrizada de mezcladores para extrusión de termoplásticos utilizando la interfase de programación que se encuentra integrada al software CAD SolidWorks.

### 9.1. ESTRUCTURA DEL ASISTENTE

Para la modelación paramétrica de los mezcladores, se observa que no existen gran cantidad de acciones comunes como en el diseño de los tornillos debido a que cada accesorio tiene su propia geometría, definida a su vez con sus propias variables, por lo tanto, es necesario realizar un módulo por separado para cada mezclador.

El procedimiento llevado a cabo para la programación de la aplicación consiste en modelar cada mezclador. Luego mediante la herramienta de macros incorporada en el software CAD seleccionado, se graban las respectivas acciones para finalmente en el editor de Visual Basic analizar, modificar y depurar el código.

La estructura de la aplicación, ilustración 40, consta de una serie de formularios y subrutinas que se relacionan entre si y operan de la siguiente manera:

- FORM\_PRINCIPAL: Es el formulario de presentación. Permite abrir el formulario de opciones.
- FORM OPCIONES: Formulario para la selección del tipo de mezclador que el usuario quiere modelar. Permite abrir el formulario del mezclador seleccionado.

- FORM\_PINES: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador de pines. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_AXON: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador Axon. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_DULMAGE: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador Dulmage. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_SAXTON: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador Saxton. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_DOUBLE: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador Double Wave. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_PINEAPPLE: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador de romboides. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_BLISTER\_RING: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador de anillo Blister. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_LEROY: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador Maddock. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_EGAN: En este formulario se ingresan los parámetros para modelar el mezclador Egan. Permite abrir el formulario de puntas.
- FORM\_PUNTAS: Formulario para la selección del tipo de punta. Permite ejecutar la Subrutina PRINCIPAL\_1.
- SUBRUTINA PRINCIPAL\_1: Dependiendo del mezclador elegido en el formulario de opciones, llama a la subrutina correspondiente para que modele el mezclador con la punta seleccionada.
- SUBRUTINA BLISTER\_RING: Modela el mezclador de anillo blister con la punta seleccionada.
- SUBRUTINA AXON: Modela el mezclador Axon con la punta seleccionada.

- SUBROUTINA PINES: Modela el mezclador de pines con la punta seleccionada.
- SUBROUTINA PINEAPPLE: Modela el mezclador de romboides con la punta seleccionada.
- SUBROUTINA LEROY: Modela el mezclador Maddock con la punta seleccionada.
- SUBROUTINA SAXTON: Modela el mezclador de Saxton con la punta seleccionada.
- SUBROUTINA DULMAGE: Modela el mezclador Dulmage con la punta seleccionada.
- SUBROUTINA DOUBLEWAVE: Modela el mezclador de doble onda con la punta seleccionada.
- SUBROUTINA EGAN: Modela el mezclador Egan con la punta seleccionada.

Ilustración 40. Código en Visual Basic

```

Microsoft Visual Basic - MODELACION_PARAMETRICA_MEZCLADORES [PRINCIPAL (Code)]
Project - MODELACION_PARAMETRICA_MEZCLADORES
  SolidWorks Objects
  Forms
    FORM_AXON
    FORM_BLISTER_RING
    FORM_DOUBLE
    FORM_DULMAGE
    FORM_EGAN
    FORM_LEROY
    FORM OPCIONES
    FORM_PINEAPPLE
    FORM_PINES
    FORM_PRINCIPAL
    FORM_PUNTAS
    FORM_RAW
    FORM_SAXTON
  Modules
    PRINCIPAL

(General) EGAN
Dim swApp As Object
Dim Part As Object
Dim SelMgr As Object
Dim boolstatus As Boolean
Dim longstatus As Long, longwarnings As Long
Dim Feature As Object

Public Sub PRINCIPAL_1()
Set swApp = Application.SldWorks

Set Part = swApp.ActiveDoc

Set Part = swApp.NewDocument("C:\archivos de programa
Set Part = swApp.ActivateDoc2("Part21", False, longst

If FORM OPCIONES.OPCION_BLISTER_RING = True Then
BLISTER_RING
End If
If FORM OPCIONES.OPCION_AXON = True Then
AXON
End If
If FORM OPCIONES.OPCION_PINES = True Then
PINES
End If
If FORM OPCIONES.OPCION_PINEAPPLE = True Then
PINEAPPLE
End If
If FORM OPCIONES.OPCION_LEROY = True Then
LEROY
End If
If FORM OPCIONES.OPCION_SAXTON = True Then
SAXTON

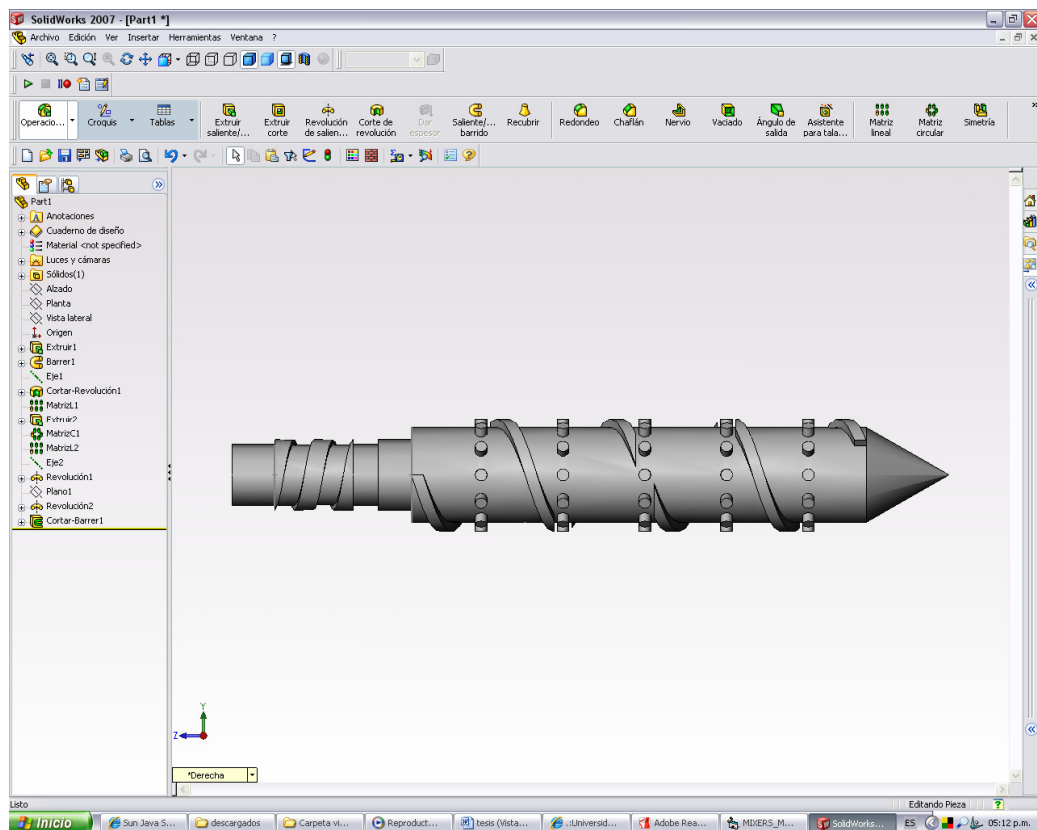
```

Elaboración propia

## 9.2. CONFIGURACIÓN DEL ASISTENTE

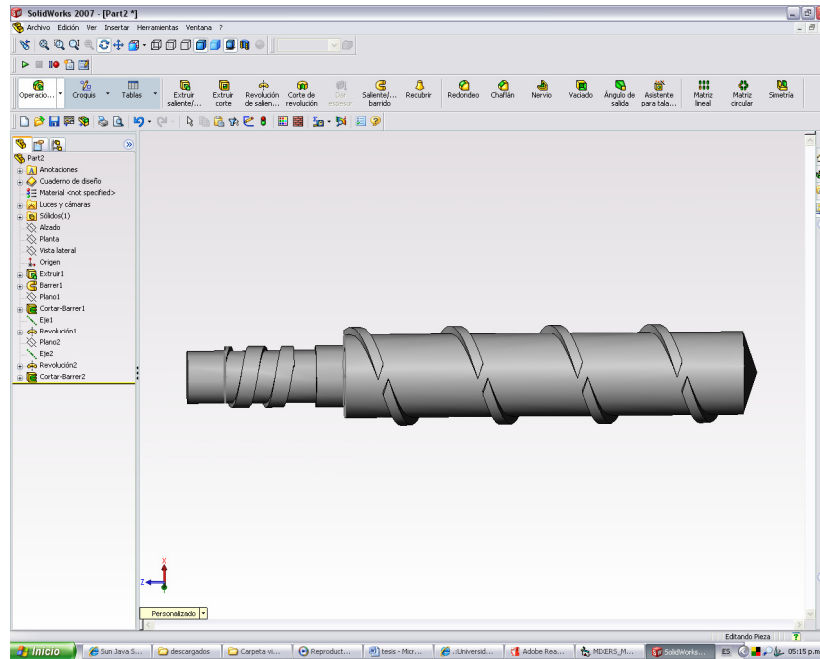
A continuación se muestra una posible configuración para la modelación de cada uno de los mezcladores, teniendo en cuenta que se pueden lograr una gran cantidad de resultados dependiendo de las distintas combinaciones entre las variables. Ver desde la ilustración 41 hasta la ilustración 49

Ilustración 41. Mezclador de pines modelado



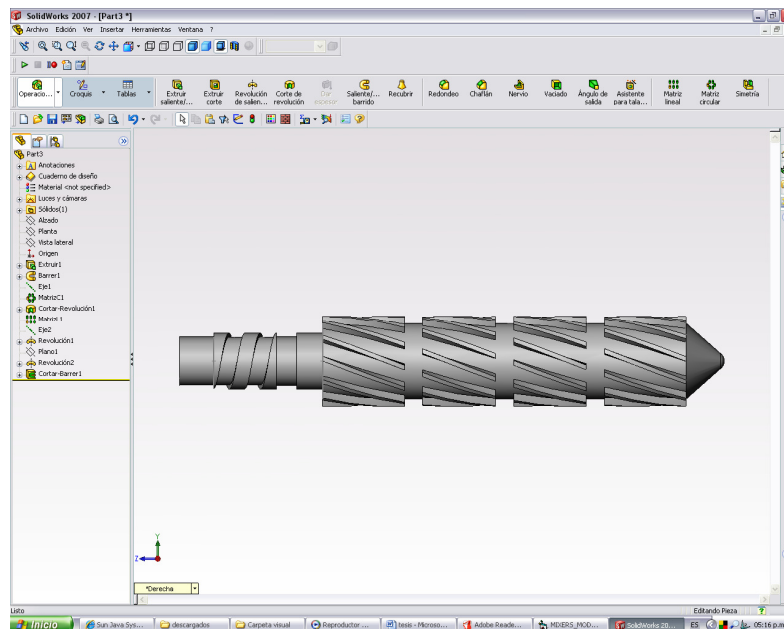
Elaboración propia

Ilustración 42. Mezclador Axon modelado



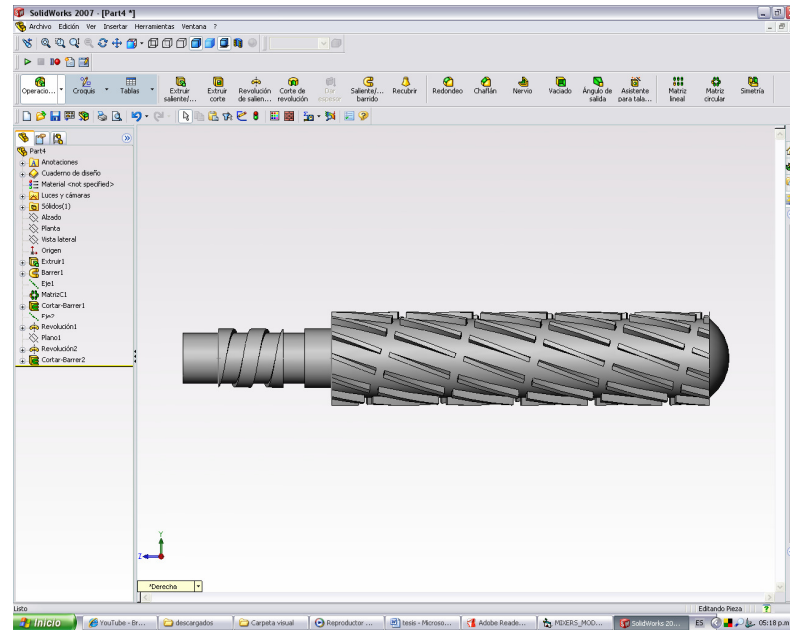
Elaboración propia

Ilustración 43. Mezclador Dulmage modelado



Elaboración propia

Ilustración 44. Mezclador Saxton modelado



Elaboración propia

Ilustración 45. Mezclador Double Wave modelado

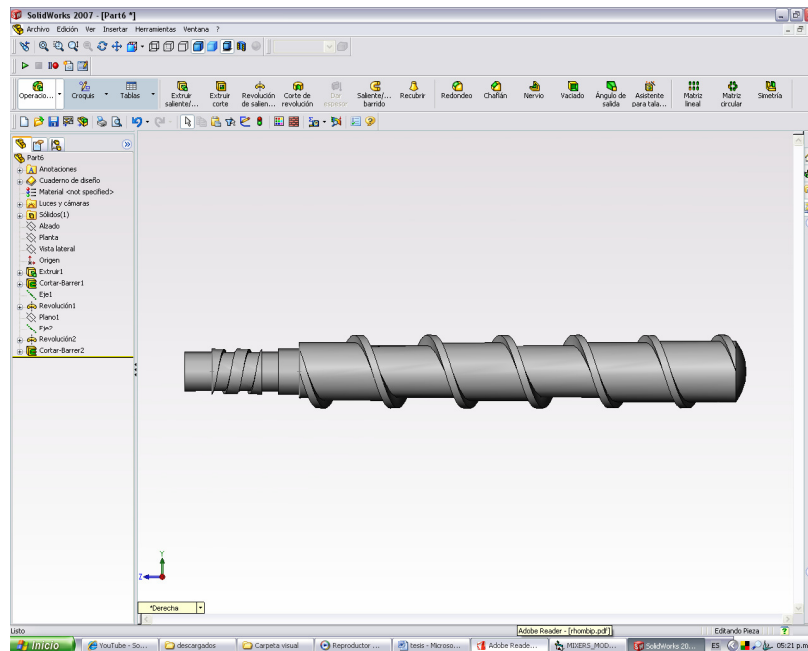
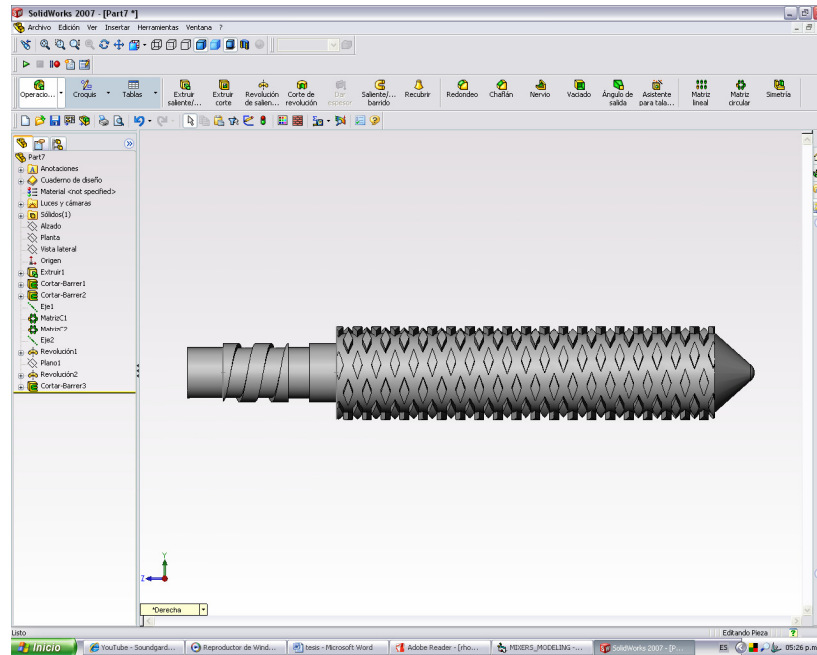
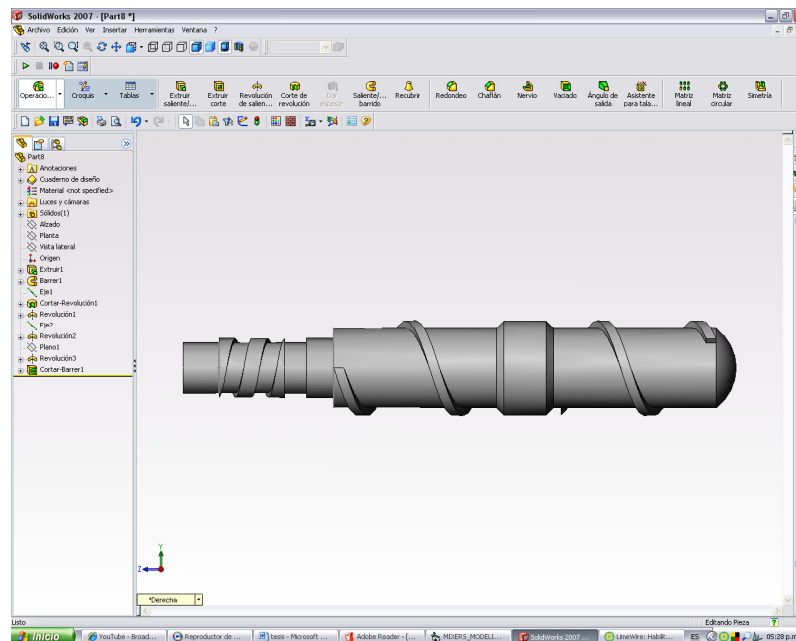


Ilustración 46. Mezclador de romboides modelado



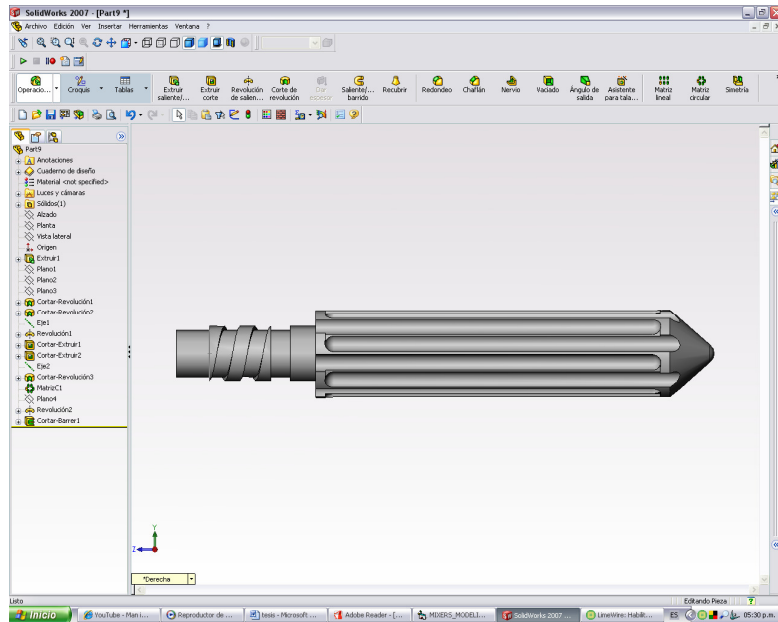
Elaboración propia

Ilustración 47. Mezclador de anillo Blister modelado



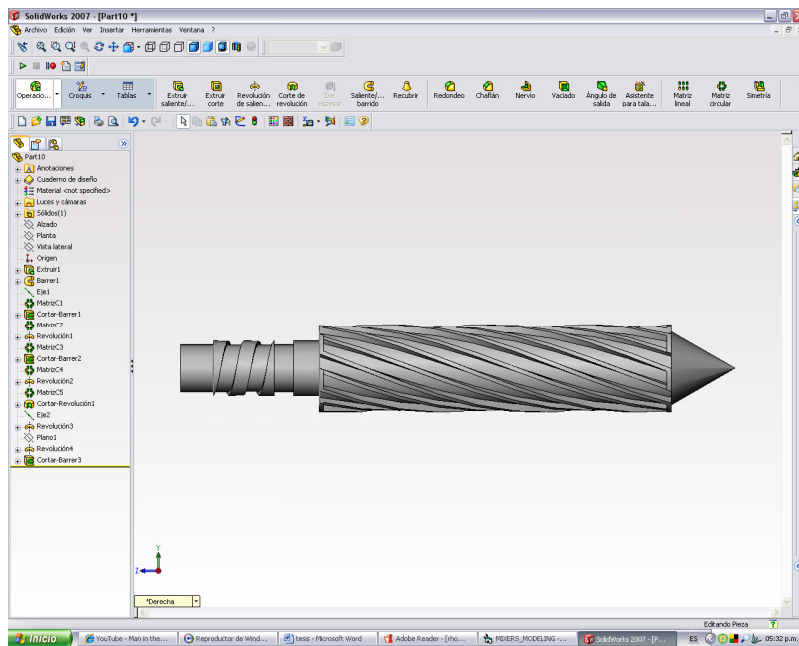
Elaboración propia

Ilustración 48. Mezclador Maddock modelado



Elaboración propia

Ilustración 49. Mezclador Egan modelado



Elaboración propia

## 10. MAQUINADO DEL MEZCLADOR

Una de las maneras más prácticas y eficientes para evaluar la utilidad y el grado de confiabilidad en el funcionamiento de la aplicación desarrollada, es mediante la fabricación del prototipo de un mezclador modelado mediante el software “Mixers Modeling”, y un programa CAM conocido en el medio con el nombre de “MasterCam”.

Luego de realizar la simulación del maquinado, se procede a hacer el montaje respectivo en el centro de mecanizado Milltronics ubicado en las instalaciones del laboratorio de Máquinas y Herramientas de la Universidad EAFIT, ya que este proporciona la opción de un cuarto eje, lo cual es de vital importancia para obtener el resultado esperado. Ver ilustración 50

Ilustración 50. Centro de mecanizado Milltronics



MILLTRONICS®, 2007

En primer lugar, se decide utilizar como material para la fabricación del prototipo, Poliacetil, el cual es un polímero cuyas propiedades de maquinabilidad son las adecuadas, además que proporciona un excelente acabado superficial. El tipo de accesorio elegido es un mezclador distributivo de romboides simétricos, más conocido con el nombre de “piña”, cuyas características geométricas para el modelado se enumeran a continuación:

- Diámetro externo: 50mm
- Profundidad del canal: 5mm
- Longitud de la zona de mezcla: 200mm
- Ancho del canal: 7mm
- Paso del canal: 50mm
- Punta cónica con redondeo

Sin embargo, antes de efectuar el montaje del material en el centro de mecanizado CNC, se deben realizar una serie de operaciones con el fin de obtener las mejores condiciones de trabajo y poder garantizar una pieza idéntica a la mostrada por la simulación. En primer lugar, se corta un tramo de eje de 300mm en una sierra de disco para evitar la flexión del mismo durante el maquinado debido a la fuerza ejercida por la herramienta de corte, ver ilustración. Posteriormente se lleva a cabo en un torno convencional, un refrentado en una de las caras del eje, con el fin de darle precisión al momento de posicionar la herramienta y de centrar la pieza en el contrapunto. Ver ilustraciones 51 y 52 .

Ilustración 51. Corte transversal del eje con sierra de disco



Elaboración propia

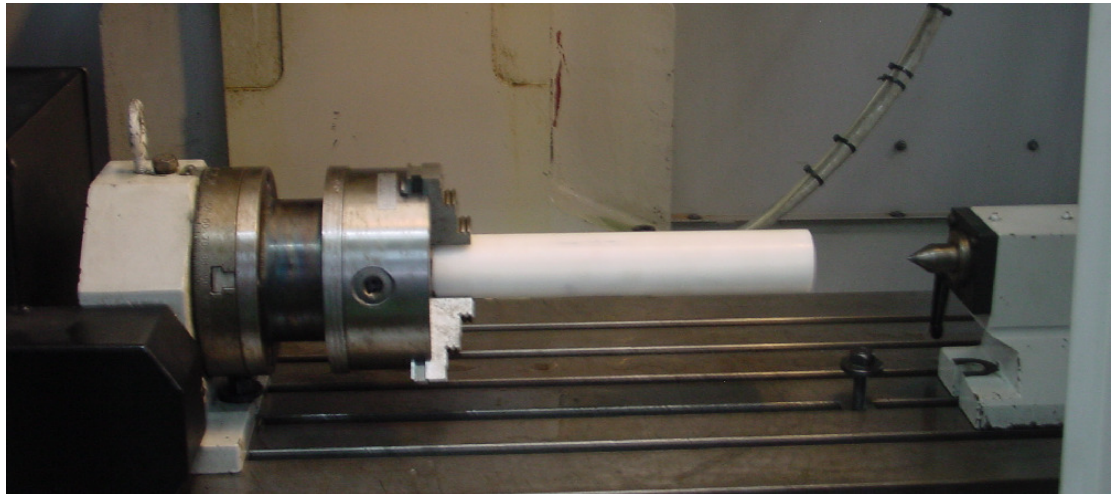
Ilustración 52. Refrentado en torno convencional



Elaboración propia

El montaje no requiere de el uso de calzas debido a la poca longitud de maquinado. Este proceso es realizado tal y como lo muestra la ilustración 53.

Ilustración 53. Montaje del eje a maquinar



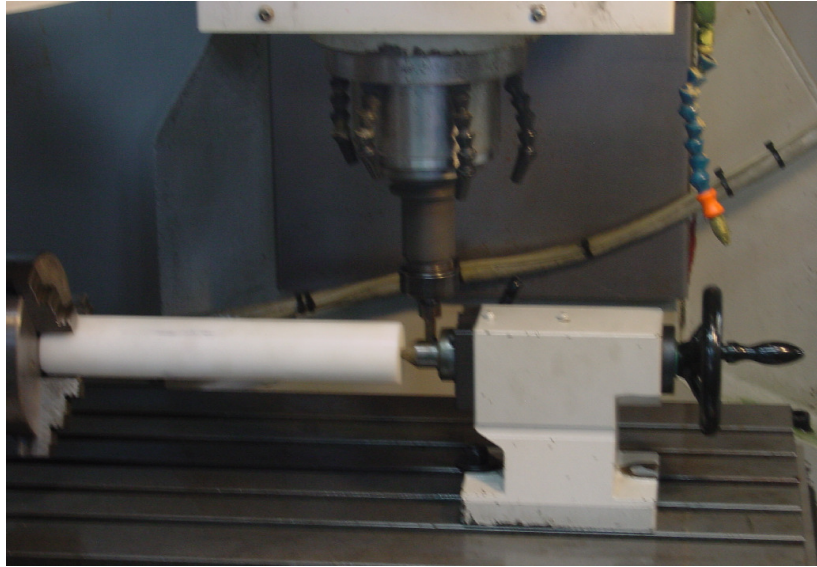
Elaboración propia

Una vez realizado el montaje, por medio del palpador adecuado se procede a ubicar los ceros de cada coordenada. Ver ilustración 54.

La herramienta utilizada para el maquinado es una fresa de punta redonda con un diámetro de 5mm. En la ilustración 55 se puede observar la herramienta durante el proceso de maquinado, el cual tiene una duración aproximada de 1.5 horas.

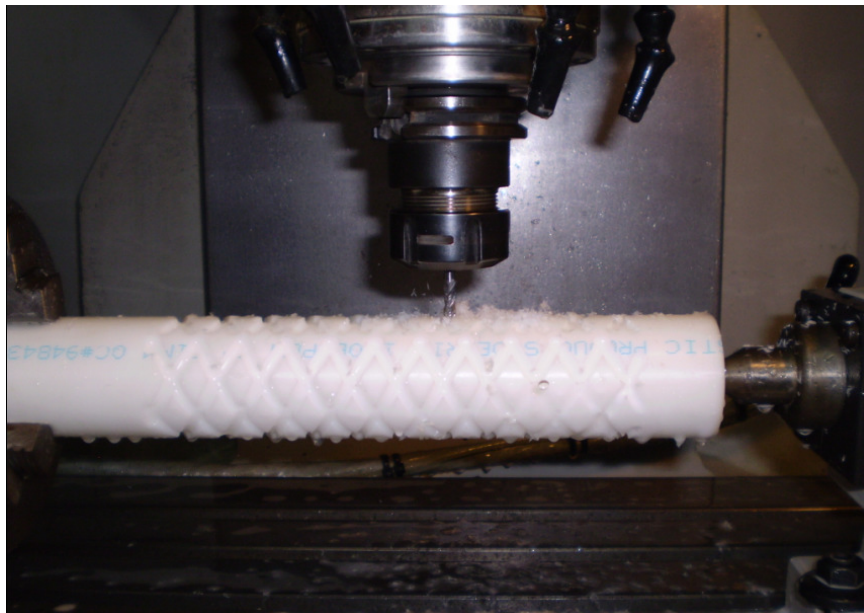
El husillo de la máquina gira a una velocidad de 6000RPM, las operaciones de desbaste se realizan con un paso de 2mm y una profundidad de corte de 2mm, y durante el acabado se utiliza un paso de 0,5mm y una profundidad de corte de 1mm.

Ilustración 54. Ubicación de las coordenadas



Elaboración propia

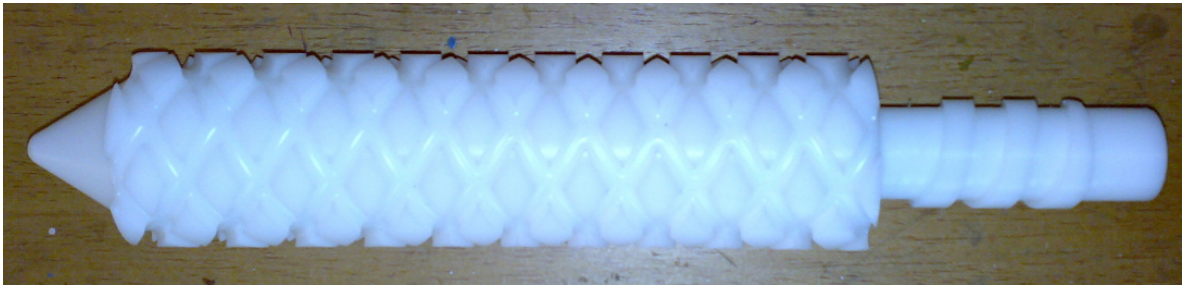
Ilustración 55. Proceso de maquinado del mezclador de romboides



Elaboración propia

Al terminar por completo el maquinado de la zona de mezcla de dicho dispositivo, se procede a realizar la punta cónica con redondeo y el sistema de acople en un torno convencional de forma manual. De esta manera se obtiene el prototipo esperado tal y como lo muestra la ilustración 56.

Ilustración 56. Prototipo de mezclador maquinado



Elaboración propia

## 11. PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

El uso de los mezcladores es común en los procesos de extrusión de termoplásticos, y aunque existen una gran cantidad de diseños, los detalles del comportamiento del flujo y la efectividad del mezclado no son bien comprendidos. Dado que la aplicación desarrollada en este proyecto no se encarga propiamente del análisis de los mezcladores se recomienda que a partir de esta se desarrolle una nueva encargada de comparar mediante análisis computacionales como el BEM (3-Dimensional boundary element method) las distintas geometrías de acuerdo a la eficiencia, presión y consumo de energía.

Se recomienda además recopilar en una sola aplicación, todos los asistentes computacionales realizados a partir de proyectos de grado anteriores y de los trabajos de la materia extrusión de polímeros.

## 12. CONCLUSIONES

A pesar de que el proceso de extrusión, en especial el diseño y el comportamiento del tornillo, es un tema en constante investigación y desarrollo, obtener los conceptos, parámetros y variables relacionadas con los mezcladores es bastante complejo, puesto que la bibliografía sobre este tema es escasa y restringida.

La aplicación desarrollada, "Mixers Modeling", permite modelar paramétricamente mezcladores para extrusión de termoplásticos de una manera rápida y didáctica, de tal forma que el resultado obtenido cumple con los requerimientos del usuario.

Para el desarrollo del software no fueron utilizados modelos matemáticos ni ecuaciones que relacionan variables y parámetros geométricos, debido a que en la bibliografía encontrada los autores no proporcionaban dichos recursos, lo que implica que la persona que desee utilizar la aplicación debe tener algunos conocimientos básicos sobre los mezcladores que le permitan obtener la geometría más eficiente según las características del proceso.

La herramienta CAD elegida para el desarrollo de la aplicación, SolidWorks 2007, y la plataforma de programación, Visual Basic, ofrece excelentes alternativas debido a su fácil manejo y gran compatibilidad, además, permiten vincular este proyecto, no solo con otros realizados anteriormente, sino también con futuros trabajos que impulsen a la Universidad EAFIT a ser líder en investigación e innovación en materiales poliméricos.

El mezclador prototipo fabricado mediante el uso de un software CAM llamado Matercam, permitió evaluar el desempeño de la aplicación, puesto que a partir de la geometría obtenida fue posible generar la superficie necesaria para programar el código de maquinado.

En la industria local no se tiene la suficiente conciencia acerca de la importancia que tiene el invertir en grupos de trabajo y tecnología para la investigación y el desarrollo de nuevas tendencias productivas que brinden una mayor calidad a sus productos y servicios sin afectar la productividad, lo anterior, debido a que muchos procesos aún se manejan de forma empírica, sin herramientas tan útiles y versátiles como esta aplicación computacional, por el simple hecho de que solo se tienen en cuenta los altos costos que estas demandan y no los grandes beneficios que pueden .

## 13. BIBLIOGRAFÍA

### 13.1. CLÁSICA

ARISTIZABAL BOTERO, Santiago; SAENZ AGUDELO, Daniel y VALENCIA ESTRADA, Francisco. Modelación paramétrica y manufacturera de tornillos para extrusión de termoplásticos utilizando sistemas CAD/CAM/CAE. Medellín, 2005. P.V.p. Trabajo de grado (Ingeniería de Producción). Universidad EAFIT.

BERNAL SIERRA, Luís Felipe. Aplicación de una herramienta de Ingeniería asistida por computador para el análisis unidimensional de tornillos de extrusión para termoplásticos. Medellín, 2005. P.V.p. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad EAFIT.

CHUNG, Chang I. Extrusion of polymers: theory and practice. Cincinnati: Hanser, 2000. 340p. ISBN 1-56990-288-7

HENSEN, Friendhelm. Plastics extrusion Technology. Munich : Hanser, 1988. 738p. ISBN 3446145893.

NORIEGA, Maria del Pilar et al. Curso de Introducción a la extrusión de termoplásticos. Medellín, Colombia: ICIPC, 1996. 120P

RAUWENDAAL, Chris. Polymer extrusion. 3 ed. Cincinnati: Hanser, 1994. 568p. ISBN 1569901406.

RIOS, Antoine C. et al. Experimental and numerical study of rhomboidal mixing sections. En: Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol 24, No. 1 (Jan. 2000); p. 89-94

ELEMANS, P. H. M y MEIJER, H. E. H. On the modeling of continuous mixers. Part II: The cokneader. En: Polymer Engineering & Science, Vol 30, No. 15 (1990); p. 893-904

\_\_\_\_\_. The ABC's of extruder screw design. En: Advances in Polymer Technology, Vol 9, No. 4 (1989); p. 301-308

SCOTT, Chris y MACOSKO, Christopher. The recirculating screw mixer: A new small-volume mixer for the polymer laboratory. En: Polymer Engineering & Science, Vol 33, No. 16 (1993); p. 1065-1078

ERWIN, Lewis y MOKHTARIAN, Farzad. Analysis of mixing in modified single screw extruders. En: Polymer Engineering & Science, Vol 23, No. 2 (1983); p. 49-60

HAN, Chang y KIM, Young. The effect of mixing on the modes of dispersion and rheological properties of two-phase polymer blen. En: Journal of Applied Polymer Science, Vol 19, No. 10 (1975); p. 2831-2843

YAO, W.G C. et al. Mixing efficiency in a pin mixing section for single-screw extruders. En: Polymer Engineering & Science, Vol 41, No. 6 (Jun. 2001); p. 908

RWEI, Syang. Distributive mixing in a single-screw extruder--Evaluation in the flow direction. En: Polymer Engineering & Science, Vol 41, No. 10 (Oct. 2001); p. 1665

\_\_\_\_\_. Understanding extrusion. Munich : Hanser publisher, 1998. 190p. ISBN 3446181636.

SPENS, Mike. Automating SOLIDWORKS 2004 using macros. S. L. : SDC, 2004. 196p. ISBN 158503164X.

TADMOR, Zehev y KLEIN, Imrich. Engineering principles of plasticating extrusion. New York : Van Nostrand Reinhold, 1970. 500p.

MORTON-JONES, D. H. Procesamiento de plásticos : Inyección moldeo hule PVC. MEXICO : LIMUSA, 1993. 302p. ( ). ISBN 9681844343

## 13.2. INTERNET

### ACOPLÁSTICOS@

Información de procesamiento de polímeros en general – Visitado en mayo de 2007. [http://www.acoplasticos.com/info/recursos\\_educativos/plasticos\\_s\\_xx.pdf?id\\_sesion=](http://www.acoplasticos.com/info/recursos_educativos/plasticos_s_xx.pdf?id_sesion=)

### AXON MACHINERY@

Tornillos para extrusión – Visitado en mayo de 2007. <http://www.axonmachinery.se/ccol4n.htm>

### PLASTICS TECHNOLOGY@

Tecnología del plástico - Visitado en Abril de 2007. <http://www.ptonline.com/articles/199907fa2.html>

#### PLASTICS TERMS@

Glosario de abreviaturas y términos de plásticos – Visitado en Mayo de 2007.  
<http://www.telfordsmith.com.au/glossary.asp?letter=&page=5>

#### PATENT STORM@

Patentes mezcladores dispersivos – Visitado en Mayo de 2007  
<http://www.patentstorm.us/patents/5932159-description.html>

#### RAUWENDAAL EXTRUSION ENGINEERING@

Ingeniería de procesamiento de polímeros - Visitado en mayo de 2007.  
[http://www.rauwendaal.com/FEATURE\\_VIP.htm](http://www.rauwendaal.com/FEATURE_VIP.htm)

#### RDRAY@

Patentes de tornillos y mezcladores de extrusión - Visitado en mayo de 2007.  
<http://www.rdray.com/extruder.htm>

#### SCHOOL OF ENGINEERING UNIVERSITY OF BRADFORD@

Reología aplicada y procesamiento de polímeros - Visitado en mayo de 2007.  
<http://www.brad.ac.uk/acad/rheology/polymer/ctm.htm>

#### UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE@

Oficina de patentes de los Estados Unidos – Visitado en Junio de 2007.  
<http://www.uspto.gov/index.html>

XALOY@

Fabricante sistemas plastificación – Visitado en Julio de 2007

<http://www.xaloy.com/>

UNIQUE MIXER@

Fabricante de mezcladores – Visitado en Septiembre de 2007.

[http://www.uniquemixer.com/products\\_mixer\\_sigmamixer\\_extruder.htm?gclid=CM](http://www.uniquemixer.com/products_mixer_sigmamixer_extruder.htm?gclid=CM)

ORrZeV9o0CFRUBZwodpArnNQ

SPIREX@

Fabricante sistemas plastificación – Visitado en Julio de 2007

<http://www.spirex.com/program/misc/home.asp>

RDRAY@

Fabricante sistemas plastificación – Visitado en Julio de 2007

<http://www.rdray.com/>

WIPO@

Organización de propiedad Intelectual – Visitado en Julio de 2007

<http://www.wipo.int/ipdl/en/>