
Avances en la obtención de tableros de fibras a partir de mezclas de residuales lignocelulósicos de bagazo

M. Morales-Zamora¹, E. González-Suárez¹ y L. Mesa-Garriga²

¹Departamento de Ingeniería Química. Facultad Química- Farmacia. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba.

²Departamento de Biotecnología. Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo. São Paulo. Brasil.

Advances in obtaining fibreboards from lignocellulosic residual mixtures of bagasse

Avenços en l'obtenció de taulers de fibres a partir de mescles de residualls lignocel·lulòsics de bagàs

Recibido: 15 de septiembre de 2015; revisado: 7 de diciembre de 2015; aceptado: 4 febrero de 2016

RESUMEN

El pretratamiento del bagazo resulta fundamental en el fraccionamiento de la biomasa en sus componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina, en la reducción de la cristalinidad de la celulosa y en el aumento del área superficial accesible. El trabajo tiene como objetivo la obtención preliminar de tableros de fibras a partir de la utilización de mezclas de bagazo con residuales lignocelulósicos obtenidos en las etapas de pretratamiento del bagazo (hidrólisis ácida y enzimática). Se realiza un diseño de experimento de mezclas, enrejado simplex de Scheffe utilizando una prensa de calentamiento. Se caracterizan los residuales celulósicos utilizando la técnica analítica Puls y se evalúa la resistencia a la flexión de los tableros de fibras obtenidos. Los resultados favorecen a la utilización de mezclas de bagazo y sólido de la hidrólisis enzimática para la obtención de los tableros. Como conclusión, se propone continuar con el estudio de mezclas con adición de aglutinante y/o resina de manera que favorezcan las propiedades mecánicas de los tableros.

Palabras clave: Tableros; bagazo; celulosa; lignina; resistencia.

SUMMARY

The pretreatment of bagasse is essential in the fractionation of biomass into major components: cellulose, hemicellulose and lignin, in reducing cellulose crystallinity and increased accessible surface area. The work has as purpose at obtaining preliminary fibreboard from the use of mixtures of lignocellulosic residual bagasse obtained in steps bagasse pretreatment (acid and enzymatic hydrolysis). Design experiment mixtures Scheffe simplex lattice using a heating press is performed. Cellulosic residual are characterized using analytical technique Puls and resis-

tance to flexion of the fiberboard obtained is evaluated. The results favoring the use of mixtures of solid bagasse and enzymatic hydrolysis for obtaining boards. In conclusion, it is proposed to continue the study of mixtures with addition of binder and / or resin so as to favor the mechanical properties of the boards.

Key words: Boards; bagasse; cellulose; lignin; resistance.

RESUM

El pretractament del bagàs resulta fonamental en el fraccionament de la biomassa en els seus components principals: cel·lulosa, hemicel·lulosa i lignina, en la reducció de la cristallinitat de la cel·lulosa i en l'augment de l'àrea superficial accessible. El treball té com a objectiu l'obtenció preliminar de taulers de fibres a partir de la utilització de mescles de bagàs amb residualls lignocel·lulòsics obtinguts en les etapes de pretractament del bagàs (hidròlisi àcida i enzimàtica). Es realitza un disseny d'experiment de mescles, enreixat simplex de Scheffe utilitzant una premsa d'escalfament. Es caracteritzen els residualls cel·lulòsics utilitzant la tècnica analítica Puls i s'avalua la resistència a la flexió dels taulers de fibres obtinguts. Els resultats afavoreixen la utilització de mescles de bagàs i sòlid de la hidròlisi enzimàtica per a l'obtenció dels taulers. Com a conclusió, es proposa continuar amb l'estudi de mescles amb addició d'aglutinant i / o resina de manera que afavoreixin les propietats mecàniques dels taulers.

Paraules clau: Taulers; bagàs; cel·lulosa; lignina; resistència.

*Autor para la correspondencia: marlenm@uclv.edu.cu;
Telf: (53) (422)-81164; Fax: (53) (422)-81608

INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de los tableros a partir de bagazo han experimentado un continuo ascenso debido, fundamentalmente, a su adaptabilidad para sustituir elementos de la madera maciza, sobre todo como material en la industria de la construcción, así como a la no corta indiscriminada de árboles, haciendo uso de producciones limpias.

En el mundo se fabrican diferentes tipos de tableros donde se destacan los de fibra y partículas. Los mismos son fabricados a partir de fibras de madera o bagazo húmedas, sometidas a gran presión y elevada temperatura. Para unir las fibras se utilizan diferentes tipos de aglomerantes, siendo de los más empleados las resinas fenólicas, las resinas de poliuretano y distintos adhesivos basados en urea, formol o melanina, parafina, entre otros, sin embargo, aprovechar las bondades del uso de resinas naturales contenidas en las mismas se hace una práctica constante. Dentro de los de fibras están los: tableros no prensados de baja densidad ($0,02-0,4 \text{ kg/m}^3$), los tableros prensados de alta densidad ($800-1000 \text{ kg/m}^3$) y tableros de media densidad ($600-900 \text{ kg/m}^3$) [1, 2]

Los tableros de fibras delgados, se emplean como paramentos de puertas plana, elementos de electricidad, industria del calzado, molduras, elementos curvos para mobiliario, rodapiés, traseras de muebles, paredes laterales de ataúdes, embalaje, entre otras aplicaciones. Los tableros de mayor espesor son empleados en mobiliarios de hogar y oficinas, así como, en todos los elementos decorativos y de carpintería de interior como en el caso de tableros de fibras resistentes a la humedad en mobiliario de cocina y baño, de aquí su gran importancia. [1, 2, 3]

Las tecnologías de producción de tableros de fibras son: tecnología por vía seca y tecnología por vía húmeda.

Tecnología por vía seca. En esta tecnología se elaboran las fibras de madera o bagazo a partir de trozos de estos materiales; se añade parafina y posteriormente, se seca directamente en un secadero con una corriente de aire caliente.

Tecnología por vía húmeda. Las fibras se mezclan con agua hasta crear una masa, con adición de parafina y látex. La masa se coloca sobre la máquina formadora generando un manto húmedo donde se elaboran los tableros. En esta máquina se elimina aproximadamente el 50 % del agua a través de aspiradores al vacío y cilindros prensadores, se secan en un túnel de secado hasta un 6% de humedad aproximadamente. Finalmente se recortan y se almacenan. Los restos del producto se reciclan al proceso de producción [2, 3, 4, 5]

El bagazo constituye el mayor subproducto de la industria azucarera y se usa fundamentalmente en la generación de energías térmica y eléctrica, para el consumo de los ingenios y plantas de derivados, como materia prima para la producción de tableros, alimento animal, furfural, y más reciente hacia la producción de etanol de segunda generación.

Se conoce que, dada la complejidad estructural de la biomasa lignocelulósica, se hace necesaria una etapa de pretratamiento eficaz para lograr incrementar el balance global de los procesos de conversión posteriores. El objetivo del pretratamiento es romper la estructura de la fibra de lignocelulosa para facilitar el ataque enzimático. Durante el pretratamiento se produce: el fraccionamiento de la biomasa en sus componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina), la reducción de la cristalinidad de la celulosa y el aumento del área superficial accesible [6]

De los pretratamientos más utilizados con el bagazo, se tiene la hidrólisis ácida y la hidrólisis enzimática. [7,8] En

la figura 1 se muestra un diagrama esquemático del pretratamiento del bagazo. En ambos pretratamientos se obtienen residuales lignocelulósicos ricos en lignina. Para la aplicación futura de estos pretratamientos hacia el fraccionamiento del bagazo en sus diversos componentes y su utilización en productos de alto valor agregado, precisamente, resulta importante valorar el uso de estos residuales como mezclas con bagazo para la obtención de tableros de fibras.

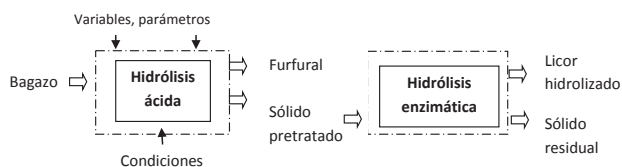


Figura 1. Esquema general de las etapas de pretratamiento del bagazo.

El objetivo del trabajo consiste en la obtención de tableros de fibras a partir de la utilización de mezclas de bagazo con los residuos lignocelulósicos de los pretratamientos de hidrólisis ácida y enzimática del bagazo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Consideraciones para la obtención de tableros de fibras

La madera, así como el bagazo, tiene como componentes fundamentales, la celulosa, la lignina y la hemicelulosa. De estos tres componentes, en el prensado tiene mayor importancia la hemicelulosa, la cual decide la resistencia del tablero. Durante el prensado del tablero se producen cambios físicos y químicos, originados por tres factores fundamentales: humedad, temperatura y presión.

La hemicelulosa se descompone, primeramente, durante la hidrólisis de la materia prima proceso que ocurre en el desfibrador descomponiéndose alrededor del 10 % y durante la hidrólisis en el prensado, influenciada fundamentalmente por la humedad ($6 \pm 2 \%$), la temperatura ($180-200 \text{ }^\circ\text{C}$), la presión específica ($4,9-5,3 \text{ MPa}$) y el pH de ($3,5-4,5$). La hidrólisis es proporcional a la humedad; cuando la humedad es menor, el colchón no se comprime totalmente debido a la plasticidad de la fibra con baja humedad por lo que afecta la resistencia del tablero. La humedad óptima para la entrada a la prensa debe ser de 60 % [2, 9].

La lignina es un polímero natural, amorfo, constituido por repeticiones de unidades de fenilpropano y sirve como adhesivo natural para aglutinar las fibras [10, 11]. Durante el tratamiento térmico en la prensa, la lignina termina de polimerizar las cadenas formadas entre los componentes de las fibras. Esta operación influye en la flexión, absorción y dilatación del tablero. [9, 11]

La presión es imprescindible para obtener buena calidad del tablero, su aplicación varía durante el ciclo de prensado. El ciclo de prensado tiene tres fases fundamentales: exprimido, secado y templado.

Para el exprimido, se eleva la presión hasta $4,9 \text{ MPa}$ y se mantiene durante un tiempo de retención. El secado continuo varía en función del espesor, grado de molienda, humedad, temperatura y estado de las mallas en la prensa. El templado o tratamiento térmico se realiza a menor presión entre $1,96-2,94 \text{ MPa}$. [3, 5, 10]

Los tiempos del ciclo de prensado son: Cierre: 40-45 s, Tiempo de retención: 10-25 s, Exprimido: 15 s, Secado:

190-210 s y Templado: 90 s. El tiempo es el que enlaza los parámetros anteriores (humedad, temperatura y presión). El tiempo es directamente proporcional a las propiedades del tablero como densidad, resistencia a la flexión y tracción; además disminuye la dilatación y la absorción. [2, 9]

Estudio experimental

Preparación y caracterización de las materias primas lignocelulósicas

La muestra de bagazo se seca a la temperatura de 35°C. Posteriormente la muestra es molida y tamizada en un molino de cuchillas Restch GMBH 5657 tipo SR-2 y tamiz CISA modelo RP20, respectivamente, hasta lograr un tamaño de partícula de 1mm; se conserva en un frasco con cierre hermético bien identificado y a temperatura ambiente.

Para la caracterización del bagazo inicial utilizado se determinaron las composiciones de glucosa, xilosa, lignina, cenizas, % de humedad, extractivos acuosos y extractivos etanólicos utilizando el método PULS de análisis. [12] Se utiliza para la evaluación del método balanza analítica Denver, estufa Biender, una centrifuga Eppendorf5417R y un HPLC LY9100 con las siguientes especificaciones de trabajo: detector, IR; columna, CARBOsep CHO-682; volumen de inyección, 20µL; fase móvil, agua; flujo, 0.4 ml/min; presión, 350 psi; temperatura del horno, 80°C; tiempo de corrida, 30 min, país de fabricación: Korea.

Tabla 2.1 Caracterización del bagazo inicial.

Componentes	%
Extractivos acuosos	3,91
Extractivos etanólicos	1,95
Extractivos totales	5,85
Humedad	7,82
Glucosa	39,28
Xilosa	26,59
Lignina	15,88
Ceniza	1,93

A partir del mejor punto experimental de la hidrólisis ácida del bagazo obtenido por [7] en investigaciones previas, se procede a la obtención del sólido residual para su caracterización. Una vez obtenido el sólido pretratado, se continúa con la etapa de hidrólisis enzimática. Para la misma se consideraron las mejores condiciones obtenidas a nivel de laboratorio en la etapa de hidrólisis enzimática por Mesa, 2014. [8] Para la caracterización de los sólidos lignocelulósicos obtenidos como residuales en cada etapa de pretratamiento se utiliza la técnica Puls; los resultados se muestran en la tabla 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2 Caracterización del sólido residual de la hidrólisis ácida.

Índice	% (m/m)
Humedad	55
Xilano residual	2,51
Celulosa	33,47
Lignina	17,9
Cenizas	2,5

Tabla 2.3 Caracterización del sólido residual de la hidrólisis enzimática.

Índice	% (m/m)
Humedad	50
Xilano residual	1,35
Celulosa	40,47
Lignina	25,4

Método de resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión R_f (en N/mm²), se calcula de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$R_f = \frac{3 \times F_{max} \times l}{2 \times b \times t^2} \quad (1)$$

Donde: $F_{máx}$ es la carga máxima en N; l (largo), b (ancho) y t (espesor) se expresan en milímetros.

La resistencia a la flexión de cada lote de probetas correspondientes a un mismo tablero se calcula como la media aritmética de las resistencias a la flexión de las probetas correspondientes, y se expresará con tres cifras significativas. Según la NC-312-2006, la resistencia a la flexión para tableros de 3 a 6 mm de espesor, a utilizar en ambientes secos y húmedos es entre 13-14 N/mm².

Procedimiento

Para la determinación del espesor, se miden el ancho y el espesor de cada una de las probetas, de acuerdo con la NC 314, en los siguientes puntos: el espesor en la intersección de las diagonales; y el ancho en la mitad de la longitud.

Se ajusta la distancia entre los ejes de los apoyos, que será de 20 veces el espesor nominal del tablero \pm 1 mm, con un máximo de 1 000 mm y un mínimo de 100 mm. La distancia entre los ejes de los apoyos se redondea al 0,5 mm más próximo. La probeta se coloca con la cara apoyada en los soportes y con su eje longitudinal perpendicular a los apoyos. La carga se aplica en el centro de la probeta. Tal y como se muestra en la figura 2.

La velocidad de carga durante la realización del ensayo se mantiene constante y se ajusta de tal forma que se alcance la carga máxima en (60 \pm 30) s.



Figura 2. Equipo para la determinación de la resistencia a la flexión.

Diseño de experimentos

El estudio consiste en la preparación de tableros de fibras de bagazo a partir de la utilización de mezclas de bagazo con los residuos celulósicos de la hidrólisis ácida y enzimática. Para la elaboración de los tableros se utilizó una prensa de calentamiento, tipo: Comercio Ercole, Busto Arsizio. Las condiciones fijadas en la prensa fueron:

Temperatura de prensado: 180 °C

Presión de trabajo: 10,79 MPa (110 kgf/cm²)

Tiempo de prensado: 10 min

Después de la maceración, se adicionaron los siguientes productos químicos, en función de las cantidades que se adicionan a nivel industrial para la elaboración de tableros de fibras: emulsión de parafina, 10 kg/m³ y sulfato de aluminio, 15 kg/m³.

Para el estudio se utilizó un diseño de mezcla enrejado simplex de Scheffe para un polinomio de segundo grado [13] teniendo como valor de referencia (100 %) las propiedades alcanzadas para el bagazo.

Se consideró por su importancia para estas producciones, esencialmente la resistencia a la flexión (Y_1) expresada en N/mm², según la NC-314-2004 y NC-310-2003. El plan experimental se realizó para una región triangular cuyos vértices fueron:

X_1 : 100 % de bagazo

X_2 : 50 % de bagazo y 50 % de residuo sólido de la hidrólisis ácida (SHA).

X_3 : 50 % de bagazo y 50 % de residuo sólido de la hidrólisis enzimática (SHE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación en la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos para los tableros de fibras. De los datos experimentales se puede obtener un modelo del tipo:

$Y_1 = 100X_1 + 44,05X_2 + 140,93X_3 - 39,58X_1X_2 - 231,3X_1X_3 - 163,48X_2X_3$, con el que se pueden estimar los valores para cada una de las propiedades, encontrándose total coincidencia entre los valores estimados y los experimentales lo que asegura la confiabilidad del modelo.

Tabla 3.1. Resultados del diseño de mezclas de residuales lignocelulósicos.

Puntos	t (mm)	l (mm)	b (mm)	F (N)	Rf N/mm ²	Y_1 ajustada
Bagazo 100%	3	100	37	14	6,306	100
2. Bagazo 50% + SHA50%	4,4	100	53	19	2,778	44,05
3. Bagazo 50% + SHE50%	3	100	50	26	8,853	140,93
4. Bagazo 75%+ SHA25%	3,5	100	50	16	3,918	62,13
5. Bagazo 50% + SHA25% + SHE25%	4,8	100	60	30	3,255	51,62
6. Bagazo 75%+ SHE 25%	3,5	100	62	20	3,950	62,64
7. Bagazo 67% + SHA16,5% + SHE16,5%	5	100	55	18	1,964	31,15

Siendo: t: espesor de la probeta, l: largo de la probeta, b: ancho de la probeta, F: carga máxima aplicada a la probeta, Rf: resistencia a la flexión.

Los resultados se evaluaron estadísticamente mediante el software Statgraphic 4.1; a continuación en la tabla 3.2 se muestran los efectos estimados para el modelo Y_1 ajustado.

Tabla 3.2. Efectos estimados para el modelo.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P	R ²	R ² Ajd.
Media	103927,	1	103927,				
Bloques	0,00277143	2	0,00138571	0,00	1,0000		
Lineal	11574,6	2	5787,28	6,55	0,0083	45,03	31,29
Cuadrático	13733,5	3	4577,83	150,10	0,0000	98,46	97,63
Error	0,00289524	12	0,00024127				
Total	129632,	21					

Dado que el valor-P para este modelo es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Y_1 y los componentes, con un nivel de confianza del 95,0%. El modelo cuadrático explica con un 98,46% la variabilidad en Y_1 . El estadístico R² ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de

variables independientes, es 97,63%. El modelo de ajuste es el siguiente:

$$Y_1 = 101,077 * Bagazo + 111,15 * SHA + 688,436 * SHE - 243,946 * Bagazo * SHA - 1010,96 * Bagazo * SHE - 735,673 * SHA * SHE \quad 2)$$

De los coeficientes del modelo, se llega a que, los mejores valores se alcanzan para mezclas de bagazo y residuo sólido de la hidrólisis enzimática. Los incrementos de mezclas empleando los residuos sólidos de la hidrólisis ácida no favorecen las propiedades mecánicas.

En las figuras 2 y 3 se pueden observar los comportamientos de la superficie respuesta estimada. Obsérvese que los contornos se ven favorecidos para valores de Y_1 por encima de 114, lo cual responde a que las mezclas con los sólidos de la hidrólisis enzimática (SHE) brindan mejores comportamientos en cuanto a resistencia a la flexión.

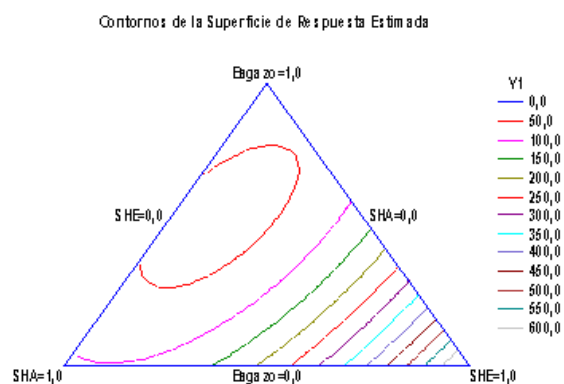


Figura 2. Contorno de la superficie respuesta para las mezclas.

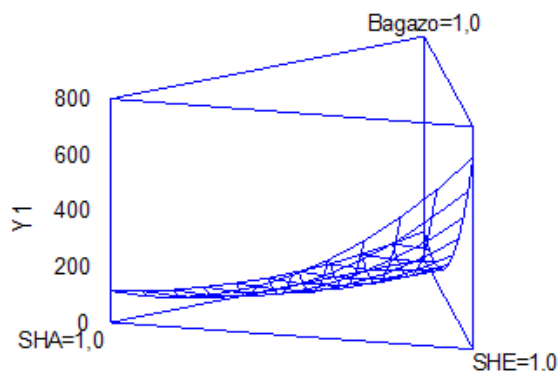


Figura 3. Superficie respuesta.

Los resultados indican que aprovechar los residuos de la hidrólisis enzimática en la fabricación de tableros de bagazo de fibra es una buena opción. Sin embargo, el residuo sólido de la hidrólisis ácida brinda bajas propiedades de resistencia a la flexión al tablero de fibra, al compararlo con los de la hidrólisis enzimática que ofrece altas propiedades. Por supuesto, estos resultados son un avance en la aplicación futura de estos pretratamientos hacia el fraccionamiento del bagazo en sus diversos componentes. Precisamente, utilizar el residuo sólido de la hidrólisis enzimática como tableros de fibras, es un elemento a favor en la utilización de este residual, toda vez que es posible aprovecharlo en un producto de alto valor agregado, así como

disminuir el consumo de bagazo destinado a la producción de tablero, sobre todo en plantas en las cuales se utilice el bagazo como materia prima para otras producciones.

CONCLUSIONES

La utilización de los residuos lignocelulósicos de la hidrólisis ácida y enzimática en mezclas de bagazo para la obtención de tableros de fibras resulta novedoso, toda vez que permite darle un uso y destino a estos residuales. Del estudio preliminar se obtiene que, la mejor variante de obtención de tableros, indica a mezclas de bagazo y sólido de la hidrólisis enzimática. Se recomienda continuar el estudio de estas mezclas hacia la obtención de tableros de fibras y partículas con adición de aglutinante y/o resina de manera que favorezcan las propiedades mecánicas de los mismos.

REFERENCIAS

1. Bermúdez, J.; Fernández, J.M. (2000). El tablero de fibra de densidad Media. (MDF) Revista del Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera, 4.
2. Gil, A. (1988). Procedimiento mejorado para fabricar tableros de fibras de material lignocelulósicos. Patente 0187642. México
3. Velásquez, JA. (2002). Producción de tableros de fibras a partir de *Miscanthus sinensis*. Tesis doctoral. Escola Técnica Superior d'Enginyeria Química. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona. España.
4. Backlund, A; Thorleif, H; De Faria, E; Amador, J. (1993). Método para la preparación de una pulpa para la digestión en un proceso continuo a partir de un material celulósico que contiene una fibra. Patente 0016323. Argentina.
5. Morales M.; González E. Hidalgo, A.; Lastre G. (2010). Propuesta de reconversión de una planta de tableros de fibras en una empresa azucarera diversificada. Centro Azúcar.2010 No 2. ISSN: 0253-5777.
6. Hsu (1996). Pretreatment of Biomass. Handbook of bioethanol production and utilization: 179-195.
7. Morales-Zamora, M., Espino-Leal, I., Mesa-Garriga L., Acosta-Martínez, D., González-Suárez, E., Castro-Galiano E. (2011). Evaluación de residuales de la hidrólisis ácida del bagazo como productos de alto valor añadido. *Afinidad* LXVIII, 556, Noviembre - Diciembre
8. Mesa, L, Morales, M, González E, Cara C, Romero I, Castro E, Mussato S. Restructuring the processes for furfural and xylose production from sugarcane bagasse in a biorefinery concept for ethanol production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. Chemical Engineering and Processing* 85 (2014) 196–202
9. Lundgren, Go'ran; Schedin, Kurt; Sislegard, Lars-Otto y Thorbjornsson, Sven-Ingvar.(1999) Método de fabricar tableros lignocelulosicos. Patente ES 2 134 438. España
10. Matte J.; Doucet J. (1988) Recent developments in lignin utilization as wood adhesive: a review", *Cellulose Chemistry and Technology* 22. p71.
11. Carvajal, O., Santo Tomás, J., Puig, J., Sosa, P. (1987) Producción Experimental Preliminar de Tableros sin Resina" ICIDCA Cuba-9 316.
12. Puls, J; Stork, J; Schuseil, J.(1993) Reactions of isolated cellulases, hemicelluloses and ligninases with fibrous materials and isolated components of woods. *Papier*, 47, 719-728,
13. Akhnazarova, S.; V. Kafarov. (1982). Experiment optimization in chemistry and Chemical industry. MIR. Moscow. 240-293
14. NC310:2003 Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. Oficina Nacional de Normalización. Cuba, ICS: 79.060.20
15. NC314:2004 Tableros de partículas y tableros de fibras. acondicionamiento y preparación de probetas para los ensayos. Oficina Nacional de Normalización. Cuba, ICS: 79.060.20
16. Saldise Medina, Juan Antonio. (2001) Procedimiento para la producción de tableros aglomerados de madera. Patente ES 2 157 170 A1. España