

APROVECHAMIENTO FORESTAL EN EL OCCIDENTE DE CUBA Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

**Dr. Daniel Alvarez Lazo
Dr. Fidel Candano Acosta
Dr. Ynocente Betancourt Figueras
Dr. José F. Rodriguez Hernandez
Dr. Ignacio Estevez Valdez
Dr. Arnaldo Díaz Acosta
Dr. Ignasio Estevez
MSc. Pablo Chavez
Dr. Osvaldo Fosado Tellez**

**UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RIO
PINAR DEL RIO 20 100, CUBA
daniel@af.upr.edu.cu**

Resumen

La presente investigación tiene el objetivo de incrementar la eficiencia y calidad de la cadena productiva que conforma el aprovechamiento forestal en el Occidente de Cuba, así como proporcionar los elementos fundamentales para utilizar maderas poco conocidas en la producción de muebles de piezas conformadas de chapas de madera.

Se obtuvieron modelos matemáticos para estimar el tiempo de las operaciones a través de los análisis estadísticos correspondientes, con la selección de las variables predictoras de mayor incidencia en la estimación del tiempo y el ajuste de estas variables para mejorar la precisión de los modelos. A partir de estos modelos y con la inclusión del volumen de madera aprovechado se determinaron los rendimientos por operaciones y se calcularon los costos de la tecnología para cada variante evaluada.

Por otra parte mediante la utilización de ecuaciones matemáticas se logra perfeccionar el proceso de troceado y aserrado, lo que facilita en unión de la aplicación de los gráficos de control, con el empleo del software CALIMADE, incrementar la producción y calidad de la madera aserrada. A su vez, se establece que las especies investigadas pueden ser utilizadas en la producción de muebles de piezas conformadas de chapas de madera. Estableciendo que a partir de los modelos matemáticos obtenidos se logra dirigir operativamente el proceso de conformación de las piezas curvado encolado.

I. INTRODUCCIÓN.

El sector forestal en Cuba aporta el 1% del Producto Interno Bruto), aunque con la proyección realizada para el año 2015 se estima que la producción de madera crecerá en 2.5 veces.

La madera, especialmente la aserrada, continúa siendo un producto muy apreciado no sólo por sus características que la hacen insustituible para algunos usos, sino también por su carácter de producto multipropósito y que se obtiene fuentes de materia prima renovables. Con el incremento continuo de la población junto con el consecuente aumento de la demanda de vivienda y de otras necesidades se espera el incremento del consumo de madera y artículos de madera en los próximos años, de acuerdo con estadísticas de FAO.

Se destinan para este fin en la actualidad 188 000 m³ (aproximadamente el 9.6% del total), solamente superada por la madera en rollo que se destina para leña (1120.000 m³) y madera rolliza (350 000 m³). Esta producción ha estado por debajo de la demanda, haciéndose necesaria la importación de productos en cantidades apreciables para la satisfacción de las necesidades nacionales.

Esta industria de aserrado en Cuba está muy alejada de los resultados de productividad medios mundiales, son muchas las causas que provocan esto, pero sin dudas la inadecuada infraestructura juega un papel predominante. Los aserraderos se caracterizan por presentar un período de trabajo amplio, ya que los mismos fueron construidos en su mayoría en la década de 1940, encontrándose equipos que poseen mambres del siglo pasado. Los diseños son inadecuados salvo algunas excepciones.

La capacidad de producción de estos aserríos, considerando un turno de trabajo, es de 788.8 m³/día, representando 231 000 m³/año de acuerdo al régimen de trabajo de cada unidad.

En la provincia de Pinar del Río es importante incrementar los volúmenes de producción de madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* donde esta

especie ocupa 71359.5 ha para un 91.1 % de la superficie total cubierta de coníferas en la provincia.

En el ámbito mundial se han implementado diferentes tecnologías que permiten mejorar los indicadores de las eficiencias, desde las basadas en la aplicación de prácticas sencillas de troceados y de aserrado, apoyándose fundamentalmente en la pericia y habilidad del personal técnico del aserradero, hasta las que parten de programas de optimización que son capaces de analizar diferentes variables y tomar decisiones de troceados o aserrados en un corto intervalo de tiempo.

Por lo tanto nuestro trabajo está encaminado a elevar los niveles de producción de madera aserrada a partir de la utilización de métodos y procedimientos que caractericen el perfil longitudinal de las trozas; la aplicación de diferentes métodos de aserrado que tengan en cuenta la calidad de la madera en bolo y aserrada de *Pinus Caribaea Morelet var. Caribaea*.

Considerando además las principales variables relacionadas directamente con el proceso de corte de la madera. Específicamente la velocidad de corte, velocidad de avance y características de los elementos cortantes; aspectos que indiscutiblemente inciden sobre la eficiencia del proceso productivo y sobre la calidad de la madera resultante con la finalidad de que satisfagan las exigencias del mercado actual.

Por otra parte se emplearán novedosas técnicas matemáticas que permitan darle un uso más racional a nuestros recursos naturales a partir de la realidad objetiva de que en nuestros bosques se imponen las trozas de pequeñas dimensiones (< 30 cm de diámetros), lo cual impone la toma de medidas para la manipulación y transformación del recurso bosque.

2. DESARROLLO

2. 1. EVALUACION DE LAS OPERACIONES DE APROVECHAMIENTO DE MADERA EN AREAS FORESTALES.

2. 1. 1 UTILIZACION DE TECNICAS DE GEOMATICA APLICADA EN EL DISEÑO DE CAMINOS FORESTALES.

Cada día se demuestra la importancia que posee el empleo de la Teledetección y los SIG para identificar la cubierta vegetal, clasificarla y cartografiarla. Existen una amplia variedad de sistemas disponibles y procedimientos desarrollados que pueden proporcionar la información necesaria rápidamente y a bajo costo. Las fotografías aéreas, los scanner multiespectrales y el radar están reconocidos por tener un verdadero lugar en la clasificación y cartografía de los ecosistemas forestales.

A partir de del empleo del Mapinfo 7.0 se logra digitalizar fácilmente las imágenes obtenidas por las técnicas de teledetección que hemos utilizado y a partir de aquí se logran confeccionar mapas temáticos que facilitan la ordenación del área; incluyendo los tópicos relacionados con la red caminera existentes en los ecosistemas forestales.

Los caminos son el aspecto más problemático en las operaciones de aprovechamiento forestal por el alto nivel del impacto ambiental que producen. La construcción de caminos obliga a eliminar vegetación y a preparar el suelo para facilitar el paso de los vehículos, esto siempre va acompañado de un aumento de los índices de erosión.

Al determinar los caminos existentes directamente, foto interpretándolos sobre las fotografías aéreas, se han obtenido mayor cantidad de los mismos, en relación a los que fueron encontrados in situ, aunque la mayoría se encuentran en la frontera del área de estudio. Ninguno de los mismos satisfacen las exigencias del movimiento dentro de la formación boscosa como consecuencias de las actividades de aprovechamiento forestal; lo cual reafirma la necesidad de una red caminera de tercer orden con la finalidad de no impactar el ecosistema forestal, posibilitando el acceso al área para la realización del manejo, aplicarle los tratamientos silviculturales y a la vez que constituyan senderos que en un futuro posibiliten el turismo científico permitiendo la recreación, para que de esta forma darle un uso más firme y aprovechable a los valores del ecosistema.

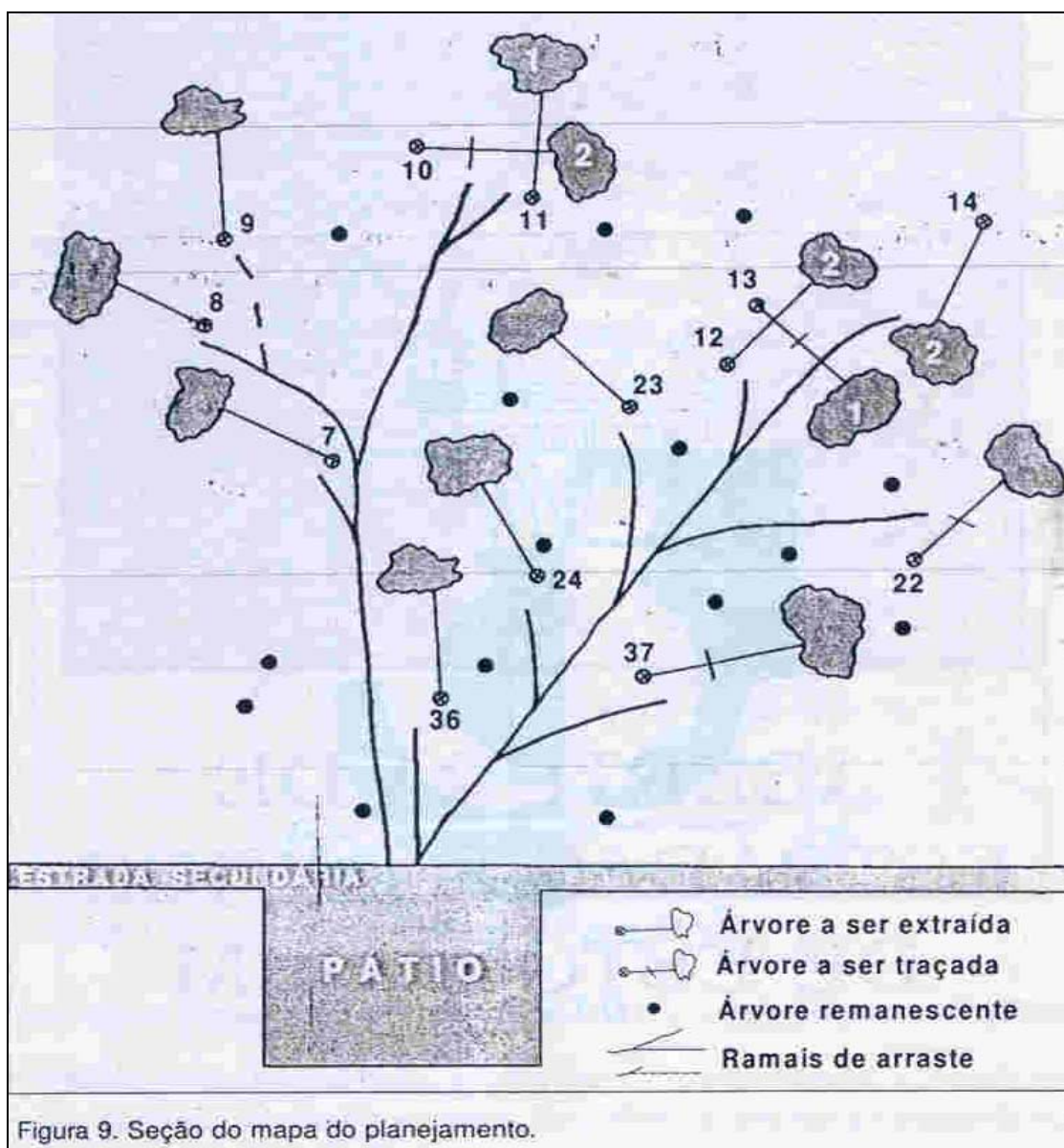


Figura 1. Planificación de caminos y vías de extracción en función de la ubicación de los árboles a cosechar. Amaral et al, 1998.

Se obtiene la variante más efectiva de red caminera, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Vías a construir
- Vías a reconstruir
- Vías con mantenimiento
- Costo de construcción
- Costo de mantenimiento
- Acceso al área para las actividades forestales

Por otra parte, se confecciona una base de datos en soporte digital, en la cual se introducen las características fundamentales que se requiere para cada uno de los caminos propuestos; obteniendo los siguientes resultados directos:

- Dimensión de la sección transversal propuesta y su influencia sobre el ecosistema forestal.

Se seleccionó la sección transversal más efectiva según las características de la zona de estudio, al tener en cuenta la hidrología del ecosistema y las características del drenaje presente

- Clasificación de los suelos para la construcción de caminos forestales; teniendo en cuenta que el principal material de construcción del camino forestal es el suelo. El tipo de suelo también juega un papel fundamental en la determinación del método de compactación a utilizar.

Por todo lo cual como una novedad muy importante en nuestra investigación lo constituye la propuesta de nuevas metodologías para la clasificación de los suelos empleados en la construcción de caminos forestales; proponiendo procedimientos que facilitan la obtención de la mejor propiedad del material de construcción de las vías de saca de productos forestales.

- Revestimiento de los caminos forestales en dependencia de las características del suelo y la profundidad del manto freático.
- Drenaje de la red caminera

2. 1.2 UTILIZACION DE LA JORNADA DE TRABAJO PARA LAS MAQUINAS, HERRAMIENTAS Y OTROS MEDIOS QUE CONFORMAN LA TECNOLOGIA DE APROVECHAMIENTO FORESTAL.

Los resultados de la utilización del tiempo de la jornada de trabajo de las herramientas de corte se muestran un 65.00 y un 68.80 % de explotación y un 35.00 a un 31.20 % de tiempo de jornada perdido, para las motosierras y las hachas respectivamente.

Dentro de los tiempos perdidos 92.80 y 94.60 minutos se deben a causas ajenas a las posibilidades técnicas de las herramientas utilizadas, la retirada de los obreros de las áreas de trabajo antes de culminar la jornada laboral, reducen la estancia de estos a 6 h aproximadamente.

Las pérdidas de tiempo por causas organizativas son de 31.30 min. para las motosierras y de 11,10 min. para las hachas. Este valor alto en las motosierras lo provocan las paradas en el corte por la presencia de los tractores acopiadores que al no existir una reserva de madera talada se aproximan a las áreas donde se realiza la operación en espera de la caída de los árboles. De eliminar las pérdidas de tiempo por causas organizativas y por la retirada de los obreros al concluir la jornada se suman 124.10 min., puede elevarse el tiempo de explotación alrededor del 90 % y el tiempo operativo entre 55 y 69 %. Esto implicaría un trabajo operativo por motosierra de 5 h por jornada con un incremento de la producción del 40 % o la posible reducción de estas herramientas para cortar los volúmenes de madera actuales.

La utilización del tiempo con hachas puede incrementarse con la mejora de las condiciones que garanticen mayor estancia de los hacheros en las áreas de tala.

2. 1. 3. MODELOS MATEMATICOS PARA ESTIMAR EL TIEMPO DE LAS OPERACIONES DE APROVECHAMIENTO DE MADERA.

El análisis de la correlación de matriz expresa que tanto las clases diámétricas, como la pendiente del terreno son variables predoctoras significativas, para estimar el tiempo de corte.



Figura 2. Extracción de madera de bajo impacto

Desde el punto de vista técnico los operadores de motosierras realizan un corte en la entalladura direccional que facilita la caída de los árboles, pero provoca mayor consumo de tiempo, de ahí que se produzca un incremento brusco en el tiempo de tala para árboles con clases diámetricas superiores.

A continuación exponemos el modelo obtenido que facilita la determinación de los tiempos de tala:

$$T = a + b * (cd)^2 - c * (S1) - d * (S2) \quad (1)$$

Donde

T- tiempo empleado en el ciclo de trabajo, min.

a, b, c, d – coeficientes del modelo

cd – clase diámetrica, cm

S1, S2 – variables que representan la pendiente del terreno

2. 1. 4. MODELOS MATEMATICOS PARA ESTIMAR EL TIEMPO DEL CICLO DE EXTRACCION DE LA MADERA CON TRACTORES Y CON ANIMALES

Al analizar los resultados de correlación se obtuvo que las variables distancia de extracción, distancia de operación del winche y pendiente del terreno son significativas para la estimación del tiempo del ciclo con el tractor.

Para la estimación del tiempo del ciclo en la extracción la variable de mayor aporte fue la distancia, esto esta dado por la baja velocidad que desarrolla el tractor con respecto a otros medios de locomoción.

El modelo para estimar el tiempo de extracción del tractor quedó conformado de la siguiente manera:

$$t = a + b * (da) + c * (dw) (S1) - e * (S2) \quad (2)$$

Donde:

t – tiempo empleado en el ciclo de trabajo del tractor en la extracción, min

a, b, c, d – coeficientes del modelo

dw – distancia de operación del winche, m

S1 y S2 – variables que representan la pendiente del terreno.

Por otra parte se ha demostrado que para la extracción con bueyes, la distancia y la pendiente constituyen variables predoctoras significativas para la estimación del tiempo del ciclo; por lo que la ecuación que caracteriza el proceso es la siguiente:

$$t = a + b * (da)^{1.5} + c * (S1) - d * (S2) \quad (3)$$

Resumiendo podemos exponer que el tiempo de explotación de las máquinas, herramientas y otros medios utilizados en las operaciones de aprovechamiento de madera es bajo, derivado de la deficiente utilización del tiempo operativo por jornadas.

Los modelos matemáticos estadísticos que se obtienen permiten realizar una evaluación profunda de un grupo de variables que definen el comportamiento del tiempo del ciclo de trabajo.

2. 2. DEFINICIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA EL MANEJO DE LA MATERIA PRIMA EN LA INDUSTRIA DEL ASERRADERO.

Uno de los principales problemas que enfrenta el país para la conservación de la madera aserrada en condiciones óptimas de calidad lo constituye el ataque de los agentes xilófagos, ya que esto provoca una baja en los niveles de calidad y en su aceptación tanto en los mercados internacionales como locales para la elaboración de artículos derivados de ella.

Actualmente resulta preocupante la falta de competitividad de la madera aserrada, frente a las producidas fuera de fronteras, provocadas por la baja calidad que presentan las mismas. Cuba, como país tropical, presenta condiciones idónea para la aparición y proliferación de los agentes xilófagos que tanto afectan la calidad de la madera.

Considerando el estado actual de los bosques de coníferas donde el menor porcentaje de madera aserrada se presenta en la Clase de Calidad I (14,5) y que durante su procesamiento la madera por un mal manejo de la materia prima se ve afectada grandemente por el ataque de hongos y una gran parte de ella llega a

descalificarse completamente a calidades inferiores, se justifica entonces la necesidad de influir sobre este importante factor buscando su mejoramiento mediante la elaboración de una tecnología que defina un aumento en la calidad de la madera.

Se debe señalar por lo tanto que estos organismos se reproducen por medio de esporas, las que se encuentran presentes en el aire localizadas alrededor de aserraderos, patios de secado y en el bosque, siendo estas trasladadas por el viento, lluvias, neblinas, insectos y en ocasiones por personas que operan en actividades de campo o por contacto directo entre una madera sana y otra infectada.

Las hifas proceden de la germinación de las esporas, las cuales a su vez al ser arrastradas por el viento, el agua y distintos animales (aves, insectos, roedores) propagan la micosis, que al presentarse ciertas condiciones del medio, el micelio de los hongos sufre variaciones originándose los cuerpos de fructificación en los que se forman las esporas, cerrándose así el ciclo biológico, el cual es el siguiente:

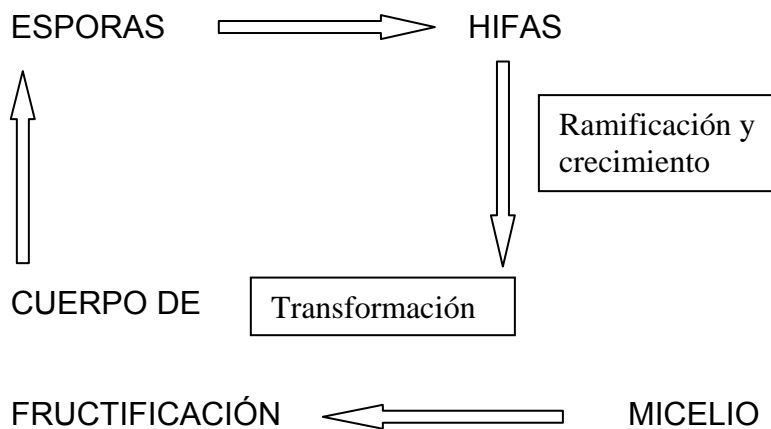


Figura 3. Ciclo Biológico de los hongos

Se plantea que el hongo generalmente se desarrolla solo en la madera nueva ya que requiere de alimentos que se obtiene de materiales de reservas (almidones y azúcares) presentes en las células vivas, al no existir una delimitación entre albura y duramen, crecen en las capas exteriores de la albura ya que aquí es donde se encuentran las sustancias de que se nutren.

En un principio se pensó que una sola especie (*Ceratostoma piliferum* o *Ophiostoma piliferum*) era la responsable del manchado. Se describió posteriormente, en uno de los primeros trabajos clásicos sobre mancha azul, 5 nuevas especies de *Ceratocystis sensu lato* causantes del manchado. Desde entonces numerosos autores han descrito otras especies igualmente causantes de manchado de la madera.

Un requisito indispensable para que ocurra el manchado azul es que la madera tenga un contenido de humedad óptimo, este fluctúa para la madera de pino entre 30 % y 120 % del peso seco (Figura 4)



Figura 4. Troza de madera con corteza atacado por hongos manchadores

El azulado de la madera incide negativamente en su aspecto estético, produciendo depreciaciones económicas siendo los principales hongos causales del azulado los géneros *Ceratostomella* y *Ceratosystis* sp entre otros.

La utilización de la madera azulada se ve centralizada en su mayor parte en la construcción, siempre y cuando las propiedades físicas y mecánicas de esta estén aptas par su uso, cabe agregar además que el empleo de la misma en otros usos está muy limitados llegando a producir pérdidas que oscilan de 50 al 100% de su valor comercial y pérdidas de prestigio a su producto.

En la tabla 1, se pueden apreciar los resultados obtenidos al realizar los experimentos relacionando la presencia de hongos que provocan el azulado de la madera aserrada de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* en el tiempo para el periodo seco así como la mejor variante en el periodo lluvioso.

Tabla 1. Intensidad de ataque por piezas en época de seca y la mejor variante en época de lluvia (%)

Período de seca período de lluvia				
Variante			Variante	
Tiempo	I (Madera corta sin corteza)	II (Madera corta con corteza)	III (Madera larga con corteza)	Mejor Variante III(Madera larga con corteza)
I. Corte al inicio	0	0	0	0
II. 7 días	0	0	0	11
III. 14 días	33	0	0	17
IV. 21 días	55	11	2	25
V. 28 días	96	17	24	35
VI. 35 días	96	25	27	39
VII. 42 días	98	36	29	

En la Tabla 1 se observa que la incidencia de la mancha azul es mayor en el período lluvioso ya que es ahí donde están creadas las condiciones necesarias para la aparición de la enfermedad tales como temperatura y humedad, ubicándose estas entre 23 y 24,5 °C, los niveles de lluvia se elevan hasta 1 642 mm; lo que conlleva a un incremento tanto de la humedad atmosférica como de la humedad en la madera si se tiene en cuenta que la madera es un material higroscópico, que

siempre tiende a tener un equilibrio con el medio que lo rodea, constituyendo este fenómeno un defecto. .

Además se plantea que entre los factores que determinan la incidencia y desarrollo de los hongos manchadores están la lluvia, el viento, la temperatura y la humedad de la madera. La incidencia más fuerte se presenta en los meses de lluvias, es decir **junio y septiembre** la menor incidencia del manchado se registra por otro lado en los meses de sequía, **julio y agosto**.

Como queda demostrado en la tabla anterior, la mejor variante en el período de seca en cuanto a intensidad de ataque es el sistema de aprovechamiento de madera larga con corteza, en el cual hasta los 21 días de permanencia de las trozas en el patio del aserradero la intensidad del ataque es solo del 2 %.

Sin embargo a partir de los 21 días en el período de seca se aprecia un incremento significativo de la presencia de la mancha azul: lo que se corresponde con el hecho de que la madera está expuesta de forma más prolongada a las condiciones ambientales de una región tropical como es Cuba, caracterizada en este tiempo (cuando se realizó el experimento) por una humedad relativa del 76%, y temperatura de 24, 3 °C, estos factores favorecen la aparición de esta ataca que degrada significativamente la calidad de la madera aserrada , con el hecho de que en esta fase (periodo de seca) todavía no están creadas las condiciones necesarias para el desarrollo de los mismos no siendo así en el período lluvioso que el tiempo de permanencia disminuye a 14 días con un incremento significativo del 11% de ataque de hongos en la madera aserrada de la especie investigada.

Se plantea que los valores óptimos de crecimiento para las especies *Ceratocystis* están entre los 22 °C y los 25 °C.

El contenido de humedad de la madera es junto con la temperatura uno de los factores decisivos que determinan el desarrollo de los hongos manchadores y estos se desarrollan en madera con un contenido de humedad adecuado. Esto se debe a

que la madera en rollo presenta un contenido de humedad más alto que la madera aserrada. En general se consideran 30% y 120% respectivamente, como los valores mínimos y máximos de humedad de la madera, a los cuales pueden crecer hongos manchadores, sin embargo, para cada especie en particular, estos valores pueden variar.

A su vez se plantea que el azulado en la madera viene constituido por alteración de color pardo en la misma y no constituye una pudrición ya que su acción se ve centralizada sobre el contenido celular de la madera sin que se produzca en ellas marcadas variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas.

Por ello, la madera poco azulada puede y viene siendo utilizada en construcciones con márgenes de seguridad similares a los de la madera sana. En contraposición a lo anterior, la madera de un azulado intenso no presenta las mismas propiedades ya que han disminuido sus coeficientes de tracción, compresión y flexión y consecuentemente con ello redonda en un limitación de sus aplicaciones.

Por otra parte en la tabla 1, se aprecia que par el sistema de aprovechamiento de madera larga los niveles de ataque son menores; por lo que es necesario que la madera no se descortezada hasta el momento de aserrarla: ya que la corteza constituye un mecanismo natural de protección de los árboles y por consiguiente tiene menor área de exposición.

Se expresa a su vez que el flujo tecnológico del aserradero la primera máquina que deberá instalarse es la descortezadora, con lo cual al utilizar el sistema de aprovechamiento de madera larga con corteza, se estará facilitando la máxima utilización de las materias primas, ya que la corteza de *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* constituye una fuente de obtención de taninos que son ampliamente utilizados, en el curtido de pieles, perforaciones de pozos de petróleo, en la medicina. Por otra parte la corteza de *Pinus* elemento para la constitución de substratos empleados en los viveros forestales.

La tecnología propuesta, además de ser la más adecuada, en dependencia del análisis estadístico utilizado, se corresponde con la lógica del proceso productivo diario de las industrias de transformación primaria de la madera en el mundo.

Además se realizó un análisis de varianza para determinar la influencia que en la proporción de calidades tiene la aparición del hongo en el tiempo, así como para cada uno de los tratamientos y teniendo en cuenta que los valores de ataque de hongos e insectos están expresados porcentualmente, estas variables no cumplen con el supuesto de normalidad. Se hicieron transformaciones en ambas variables con el objetivo de lograr normalidad lo cual no fue posible, por esta razón se utiliza el test no paramétrico de Kruskal Wallis.

En cuanto al ataque de insectos, no se encontraron diferencias significativas al comparar tratamientos ni semanas. Se estudio también la posible relación entre las variables ataques de hongos e insectos con diámetro en las diferentes secciones de la troza y no se encontró una relación matemática diferente del valor medio.

Es importante señalar la necesidad del empleo de los sistemas de aprovechamiento de madera larga para reducir la presencia de la mancha azul; por lo que es significativo que la madera sea procesada antes de los 21 días como medida de que no implique muchos gastos económicos, para reducir la presencia de tan indeseable enemigo en la calidad y resistencia mecánica de la madera en el período de seca.

A su vez, se debe resaltar que si realmente se quiere obtener un proceso tecnológico que se caracterice por bajos niveles de impacto ambiental, es necesario por tanto la reducción de la utilización de agentes químicos preservadores de la madera que de alguna manera son agentes agresivos para el medio ambiente, estos en general se utilizan a partir de Pentaclorofenol. Dichos productos son verdaderamente efectivos contra los hongos manchadores, pero muy tóxicos, por lo que su uso está prohibido en muchos países.

Es por esto que se deben considerar primeros los factores naturales, que pudieran impedir la incidencia del manchado. Por lo que este se presenta con mayor intensidad en los meses lluviosos, entonces sería necesario una mejor planeación de corta así como un mejor procesamiento de las trozas, además de evitar la permanencia de las trozas por largo período de tiempo en el bosque.

Como otra medida para la prevención de la madera contra el manchado se recomienda una mejor técnica de secado de la madera.

La importancia de esta medida recomendándose el secado hasta un 25 % de humedad a la cual ya no crecen los hongos manchadores, es necesario entonces la implementación del secado y otras medidas par evitar el manchado azul de la madera ya que las usadas son deficientes. Por lo que se recomienda en esta fase lluviosa incrementar los niveles de organización del proceso tecnológico de abastecimiento de la madera a los aserraderos.

2. 3. EFICIENCIA DE LOS ASERRADEROS

2. 3. 1 ANÁLISIS DE DIFERENTES FACTORES QUE INCIDEN SOBRE EL RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO DE MADERA ASERRADA.

Diámetro de las trozas. Se demuestra que en la medida que el diámetro aumenta también se incrementa el rendimiento de las trozas en el aserrio; por lo tanto el procedimiento de trozas de pequeñas dimensiones implica bajos niveles de rendimiento y menor ganancia en los aserraderos.

No obstante, el planteamiento de que las trozas de pequeñas dimensiones, en comparación con trozas mayores conduce a la reducción de los principales indicadores técnico-económicos de los aserraderos es sólo parcialmente válido, pues, realizando una óptima selección de la maquinaria y de los equipos es posible reducir la influencia negativa en los indicadores.

El efecto del diámetro sobre el rendimiento nos obliga a pensar en la necesidad del perfeccionamiento del aserrado de trozas de pequeñas dimensiones y trazar, además, una política que garantice en lo posible un mayor desarrollo de las existencias maderables con el objetivo de obtener trozas de grandes dimensiones y calidad destinadas a los aserraderos.

Longitud, conicidad y diagrama de troceado. Se puede afirmar que el rendimiento de las trozas en el proceso de aserrio es afectado por la longitud y por la conicidad de las trozas. En la medida que aumenten ambos parámetros se incrementa la diferencia entre los diámetros en ambos extremos de la troza.

Por lo tanto una de las formas de incrementar el rendimiento volumétrico es mediante la optimización del troceado, produciendo lógicamente madera aserrada de dimensiones requeridas. Esta observación es de peculiar importancia para la industria cubana del aserrio.

La aplicación de diagramas adecuados de troceo permite la obtención de trozas de alta calidad posible con una longitud adecuada, requisito indispensable para aumentar el rendimiento. Con el empleo de programas de optimización del troceo se obtienen trozas con características favorables para elevar la eficiencia de la conversión primaria de la madera en los aserrios.

Calidad de las trozas. Uno de los factores a tener en cuenta, particularmente en la sierra principal, para maximizar el volumen es la calidad de la troza. Las dimensiones y el volumen de la madera aserrada bajo las prácticas corrientes del procesamiento tienen una relación directa con las diferentes clases de calidad de trozas; por lo que se apoya por diferentes autores la relación de las características de la superficie de las trozas y el rendimiento de madera aserrada para establecer normas para la clasificación de trozas.

Se confirma el efecto de la calidad de la troza, especialmente la incidencia de trozas torcidas en la calidad y volumen de la madera aserrada. Existe una regla general de que un incremento en 0.1 de la proporción torcedura-diámetro conduce al decrecimiento del rendimiento volumétrico en un 5 %.

Tipo de Sierra El ancho de corte influye sobre el rendimiento de madera aserrada ya que una vía de corte ancha se traduce en más pérdida de fibras de madera en forma de aserrín y la disminución de la eficiencia de la maquinaria.

La influencia del tipo de sierra sobre el rendimiento suscita la necesidad de adquirir aserraderos de sierra principal de banda, en lugar de sierra alternativa múltiple o circular, para un mejor aprovechamiento de la materia prima; aspecto este que se logra entre otros aspectos a partir de la regulación del ancho de corte.

Una vía de corte ancha se traduce en más pérdidas de fibra de madera en forma de aserrín y la disminución de la eficiencia de la maquinaria

Diagrama de corte Las opiniones de los especialistas coinciden con diferentes autores, que afirman que los diagramas de corte tienen gran incidencia sobre la eficiencia de la conversión de madera aserrada; dependiendo de la calidad de la troza, del diseño del aserrio y de los gradientes de precio de la madera existente.

La aplicación de diagramas de corte teniendo en cuenta el diámetro, longitud, calidad y conicidad de las trozas; así como el tipo de sierra y otros factores, es una variante que favorece el incremento en calidad y cantidad de la producción de madera aserrada. Ello ha sido la base de los programas de optimización que permiten obtener resultados relevantes en la industria del aserrado

El análisis integral de toda esta información debe contribuir de cierta forma para que los empresarios forestales puedan elaborar estrategias que permitan contrarrestar el efecto negativo o favorecer el efecto positivo de los factores que más influyen sobre el rendimiento volumétrico, condición necesaria para elevar los niveles de aprovechamiento de la materia prima y la eficiencia industrial en general.

A continuación exponemos diferentes procedimientos matemáticos que posibilitan incrementar el rendimiento volumétrico de madera aserrada:

A) Al interrelacionar los factores diámetro y longitud de las trozas con el troceo y los diagramas de corte mediante la aplicación de procedimientos matemáticos se puede elevar la efectividad del proceso de conversión primaria a partir de la búsqueda de una expresión que garantice el volumen máximo de madera aserrada cuya sección sea de base rectangular a obtenerse de una troza identificada como un cono truncado; por lo que la solución del problema se resuelve de la siguiente manera:

Una troza de longitud " l " tiene forma cónica en dependencia de la variación de los diámetros en la base y la punta, esto trae como consecuencias una reducción de la eficiencia del proceso de transformación primaria de la madera en los aserrios. Se

desea encontrar un prisma de base rectangular que tenga el mayor volumen posible a partir de la troza cónica. Figura 5

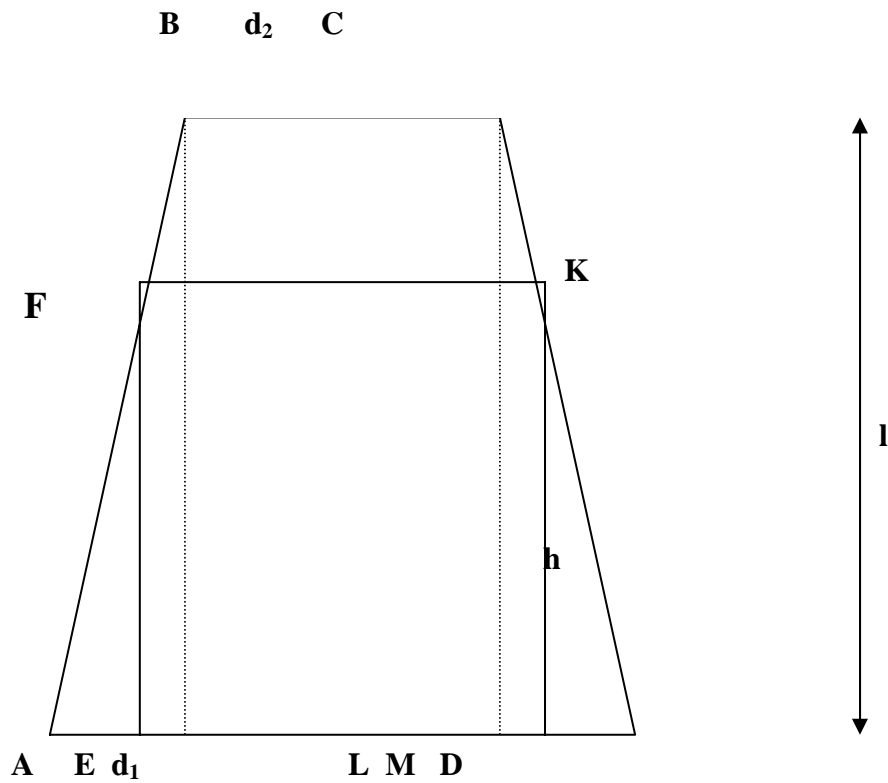


Figura 5. Sección longitudinal de la troza y el prisma de mayor volumen posible a extraer de la misma.

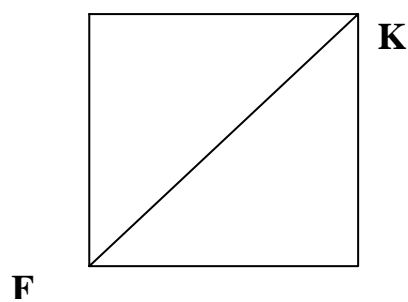


Figura 6. Sección transversal del prisma de base rectangular.

$$FK=EM=d_1-2MD \quad (4)$$

$$(MD=EA)$$

$$\frac{KM}{CL} = \frac{MD}{LD} \quad \text{donde } KM = h \quad (5)$$

$$FK = d_1 - 2MD = d_1 - \frac{(d_1 - d_2)h}{l} \quad (6)$$

$V = Ab \cdot h$. Infiriendo que el primas que nos interesa tiene base cuadrada; por lo que

$$V = (1/2) \cdot ((d_1 - d_2)/l)h^2 \quad (7)$$

Buscando el punto máximo local tenemos que:

$$\frac{dV}{dh} = (d_1 - \frac{(d_1 - d_2)}{l}h) \cdot (-\frac{(d_1 - d_2)}{l}h) + \frac{1}{2}(d_1 - \frac{(d_1 - d_2)}{l}h) \quad (8)$$

El punto máximo estacionario se determina como

$$h = \frac{d_1 l}{(3d_1 - 3d_2)} \quad (9)$$

Para la determinación de la distancia de corte para obtener el mayor volumen posible de madera aserrada de la troza utilizamos la Figura 7.

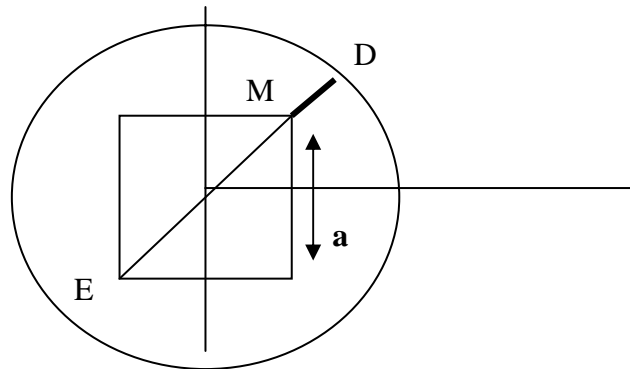


Figura 7. Determinación de la altura óptima de corte para aumentar el rendimiento volumétrico de madera aserrada

Posteriormente multiplicando la norma del vector $2b^p$ se obtiene la longitud de corte óptima.

Por otra parte, también podemos recomendar el procedimiento matemático siguiente como una alternativa para determinar la amplitud del corte de apertura; aspecto este que favorecerá la eficiencia del proceso de aserrado. Para lograr este preciado objetivo debemos utilizar los elementos expuestos en la Figura 8.

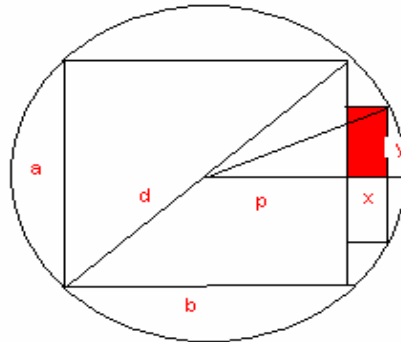


Figura 8. Representación de los diferentes parámetros utilizados en la determinación del corte de apertura.

A partir del análisis matemático de la figura7, se obtiene que

$$0,7288689868 * |r| - 0,5303300858 * r$$

Como r es positivo nos queda que:

$$0,7288689868 * r - 0,5303300858 * r$$

$$x=0,1985389009 \quad (10)$$

Tenemos que comprobar que $x = 0.1985389009r$ es la máxima, por lo que aplicando el criterio de la segunda derivada tenemos que:

$$y=0.4240352562r \quad (11)$$

Esta expresión permite determinar por dónde se debe dar el primer corte de apertura.

En la Tabla 2, se representan los valores promedios de cada indicador de la eficiencia de conversión. Los valores de rendimiento volumétrico promedio obtenidos mediante la variante actual son bajos, sin embargo, al emplear la variante propuesta los valores se encuentran muy por encima del rango determinado por diferentes autores

Tabla2. Valores promedio de diferentes indicadores de la eficiencia de conversiones volumétricas (%) obtenido en los diferentes aserraderos.

Aserradero	Variante actual		Variante Propuesta		Diferencia		
	RT	Residuos	RT	Residuos	RT	Residuos	
R. Fuentes	45.2	54.80	49.90	50.10	4.7	4.70	
A. Barba	43.5	56.50	51.80	48.20	8.30	8,30	
F. Donatien	43.5	56.60	50.50	49.50	7.00	7.10	
C. de la Tenería	51.3	48.57	60.5	39.50	9.20	9.07	

El incremento del rendimiento en un más del 7,0 % obtenido en los aserraderos Albaro Barba y Francisco Donatien a través de la mejor ubicación del corte de apertura de las trozas, equivale a un ahorro de no menos del 13 % de la materia prima, mientras que el aumento del rendimiento en más de un 4,0 % obtenido en el aserradero Rigo Fuentes, significa un ahorro de no menos del 7,0 % del volumen de madera en trozas.

En Tabla 3 a partir de los resultados obtenidos para la variante propuesta, podemos apreciar que el rendimiento aumenta con el incremento del diámetro de las trozas. Además, podemos establecer que la incorrecta localización del corte de apertura tiene una gran repercusión en trozas de pequeñas dimensiones, pues la pérdida de una pieza de 13 mm de dimensión nominal en este tipo de troza influye en mayor medida que en trozas de grandes dimensiones.

Tabla 3. Valor de rendimiento volumétrico (%) en diferentes aserraderos

CD	R. Fuentes	A. Barba	F. Donatien	C. Tenería de Guane
10	37,13	36,73	36,70	
12	43,04	42,50	42,52	
14	47,26	46,63	46,68	
16	50,43	49,72	49,80	
18	52,90	52,13	52,22	52,94
20	54,87	54,05	54,17	56,20
22	56,48	55,62	55,75	58,87
24	57,82	56,94	57,08	61,09
26	58,96	58,05	58,20	62,97
28	59,93	59,00	59,16	64,58
30	60,78	59,82	59,99	65,98

Este hecho debe constituir una reflexión muy importante para los empresarios de la industria del aserrado en el sentido de prestar una mayor atención a la ubicación en las trozas del corte de apertura, conociendo que la tendencia actual está encaminada hacia el aprovechamiento de trozas de pequeño diámetro.

Las ecuaciones de mejores resultados para la estimación del rendimiento volumétrico de las trozas se encuentran en Tabla 4.

Tabla 4. Ecuaciones para la predicción del rendimiento volumétrico (%) de madera aserrada.

Aserradero	Variante Propuesta			F
	Ecuación	r^2	E	
R. Fuentes	$Y = 72.606 - 354.797 / D$	0.5310	5.61	175.13
A. Barba	$Y = 71.370 - 346.391 / D$	0.4635	6.32	154.66
F. Donatien	$Y = 71.636 - 349.409 / D$	0.4790	6.24	165.50
C. Tenería	$Y = 85.534 - 586.705 / D$	0.9441	1.60	304.26

Ahora bien, conociendo que a nuestros aserraderos llegan trozas de diferentes diámetros, es muy importante por lo tanto desarrollar un procedimiento matemático que posibilite la determinación de la amplitud del corte de apertura en dependencia de la variación del diámetro.

2. 3. 2. UTILIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN LA PLANIFICACIÓN OPERATIVA DEL PROCESO DE ASERRADO.

Por muy sencillo que resulte un sistema de aserrado son muchas las alternativas que se pueden presentar en toda la toma de decisiones. No basta el conocimiento de diagramas de corte que logren máximos rendimientos, se necesita vincularlos con un grupo de requerimientos técnicos-económicos muy difíciles de coordinar eficientemente.

Destacan en la confección de los planes de producción de los aserraderos los siguientes elementos:

1. Calidad del producto final
2. Planes de producción por surtidos
3. Especie a procesar
4. Características de la maquinaria instalada
5. Disponibilidad de materia prima
6. Disponibilidad de tiempo en cada maquina

Estos unidos a las características físico morfológicas de la troza, permiten fijar un número no despreciable de diagramas de cortes con una calidad requerida del producto final, complicando sobremanera la toma de decisiones eficientes en estas industrias.

Construcción del Modelo Económico Matemático

Requisitos necesarios. Modelo I.

Para la construcción de los modelos que permita la optimización del aserrado de la madera por lo tanto es necesario conocer los siguientes elementos:

1. Posibles diagramas de corte a realizar asociados a cada una de las dimensiones de las trozas y los posibles surtidos a obtener.
2. Determinación del volumen de las trozas a partir de la especie, de sus dimensiones y grado de conicidad; así como su disponibilidad en el patio de almacenamiento de trozas.
3. Tiempo de máquina destinado para la ejecución de cada diagrama de corte.
4. Planes de producción de los diferentes surtidos.
5. Disponibilidad de tiempo de trabajo
6. Clasificación del sistema sobre la base de la sierra principal (Circular o banda)

A través de estos elementos se confecciona los modelos generales que debe darle solución a la problemática planteada.

Construcción del Modelo (Indices, Variables y Parámetros)

Índices, Variables y Parámetros

- i: Tipo de diagrama de corte
- j: Número de la máquina
- k: Clasificación dimensional de la troza
- l: Clasificación de los surtidos por pieza
- I: Total de diagramas de corte
- J: Total de máquinas disponibles
- K: Número de clasificaciones dimensionales a procesar.
- L: Total de surtidos posibles a obtener.

Variables

x_{ij} : Trozas a aserrar con el diagrama de corte i en la máquina j .

b_k : Variable auxiliar asociada a la clasificación dimensional k .

Q_l : Variable auxiliar asociada a la restricción informativa del surtido l (m^3)

S_l : Variable auxiliar asociada al incumplimiento del plan de producción del surtido l por falta de tiempo (m^3).

El diagrama de corte nos permite variar los posibles surtidos a obtener de una troza, lo que está en dependencia de los cortes que se realicen en los mismos sujetos a los planes de producción previstos.

Parámetros

D : Indicador a minimizar en la Función Objetivo

d_i : Desperdicio obtenido por realizar un diagrama de corte de tipo i (m^3)

δ_k : penalización por no disponer de materia prima de tipo k .

β_l : Penalización por la insatisfacción del plan de producción del surtido l .

e_{ij} : Producción del surtido l en un diagrama de corte de tipo i (m^3)

P_l : Plan de producción del surtido l (m^3)

t_{ij} : Tiempo de ejecución de un diagrama de corte de tipo i en la máquina j (min)

M_j : Disponibilidad de tiempo en la máquina j (min)

c_{ik} : Consumo de materia prima de tipo k en un diagrama de corte de tipo i (m^3)

C_k : Disponibilidad de materia prima de tipo k (m^3)

h_1, h_2 : Equilibrio en la utilización de las líneas de producción instaladas (5).

FUNCIÓN OBJETIVO

$$\text{Min} \left[D = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_i x_{ij} + \sum_{k=1}^K \delta_k b_k + \sum_{l=1}^L \beta_l S_l \right] \quad (11)$$

Sistemas de restricciones

• Restricciones de planes de producción

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J e_{ij} x_{ij} + S_l \geq P_l : l, \dots, L \quad (12)$$

- **Restricciones de disponibilidad de tiempo**

$$\sum t_{ij}x_{ij} \leq M_j; j=1, \dots, J \quad (13)$$

Restricciones de disponibilidad de materia prima

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ik}x_{ij} - b_k \leq C_k; k=1, \dots, K \quad (14)$$

- **Restricciones para el equilibrio en el uso de las líneas de producción**

$$\left(\sum_{i=1}^I t_{ij}x_{ij} \right) h_1 \leq \sum_{i=1}^I t_{ij}x_{ij} \leq \left(\sum_{i=1}^I t_{ij}x_{ij} \right) h_2; \forall j \neq j' \quad (15)$$

- **Restricciones informativas**

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J e_{il}x_{ij} = Q_l; l=1, \dots, L \quad (16)$$

- **Condición de no negatividad**

$$x_{ij}; b_k Q_l; S_l \geq 0; \forall i, j, k, l \quad (17)$$

En la función objetivo se pretende minimizar los desperdicios, o sea, todo aquello que se obtiene al realizar un diagrama de corte y que no está incluido en los surtidos trazados en dicho diagrama, los d_i los obtenemos como la diferencia entre el volumen de la troza y el volumen de madera serrada

$$d_i = VT_i - VA_i \quad (18)$$

De manera explícita la función objetivo también pretende realizar un mejor aprovechamiento de la materia prima existente en los almacenes, es por eso que se encuentran penalizadas en ella las variables auxiliares que se le adicionan a las restricciones de uso de las distintas clasificaciones dimensionales. Además el objetivo a seguir (Minimizar) obliga que las producciones planificadas sean mínimas.

Como último elemento de la **Función Objetivo** tenemos la penalización que se realiza a la variable auxiliar S_l ($\beta_l > \delta_l$), la cual reduce el incumplimiento del plan de un surtido l por no ser suficiente el tiempo de máquina disponible. Existen dos alternativas para tratar este problema, por un lado se podría haber colocado una variable auxiliar en el grupo de restricciones de disponibilidad de tiempo y haberla

penalizado en la **Función Objetivo**, pero solo se lograría conocer la infactibilidad del plan por falta de este recurso.

De la manera tratada permite, en caso de que esto ocurra, saber cuales son las piezas que se dejarán de producir considerando como criterios de selección los antes explicados. De existir algún criterio adicional para una pieza determinada esta pudiera ponderarse en su coeficiente de la Función Objetivo priorizando su producción.

IMPLEMENTACION DE LOS MODELOS ECONOMICO MATEMATICOS

Para la implementación del modelo matemático se hace necesario el cumplimiento de las condiciones mínimas:

1. Existencia de diagramas de corte potencialmente posibles a realizar en el aserrio en cuestión.
2. Clasificación de las trozas a procesar por sus dimensiones y conocimiento de los niveles de inventario de la materia prima.
3. Conocimiento de los requisitos de tiempo para procesar los diagramas de corte y tiempo destinado para ajuste de las hojas por cambio de diagrama en el caso de sierras alternativas.
4. Elementos para la estimación del volumen de desperdicios para cada diagrama de corte a partir de una estimación de valores por trozas que contenga los elementos fundamentales (especie, dimensiones, conicidad)
5. Confección de los planes de producción basándose en los puntos antes mencionados.

2. 3. 3 CONTROL DE LA CALIDAD DE LA MADERA ASERRADA

En los establecimientos objeto de estudio existe un subdimensionamiento generalizado de la madera aserrada. De acuerdo con los valores de grosor promedio de las piezas muestreadas (Tablas 5, 5, 7, 8), solo en el caso del surtido 75 mm en el aserradero Rigo Fuentes se corta la madera verde con tolerancias de volumen suficientes para satisfacer las dimensiones finales reglamentadas para el mercado.

En otros casos (surtidos 13, 50, 100 mm) en el Rigo Fuentes; surtidos de 13, 50, 75, 100 mm en el Francisco Donatien y surtidos de 75, 100 mm en el Alvaro Barba, la

madera se corta por encima de las dimensiones finales preestablecidas, pero no lo suficiente para compensar las pérdidas de volumen debido a la contracción y a la variación de aserrado, por lo que las dimensiones finales actuales de madera seca son inferiores y no podrán cumplir con las especificaciones del mercado siendo necesario destacar los casos de los surtidos 50, 100 mm en el Rigo Fuentes; donde a pesar de emplear dimensiones actuales de corte relativamente grandes (56,39 y 108,31 mm respectivamente) no pueden satisfacer las dimensiones finales preestablecidas por el mercado debido a las grandes variaciones de aserrado que se observan en este establecimiento.

Los casos más críticos son los de Tenería de Guane para todos los surtidos y Alvaro Barba para los surtidos 13 y 50 mm, en los cuales las piezas finales requeridas y por lo tanto no pueden cumplir ni mucho menos las especificaciones requeridas.

Tabla 5. Resultados de los cálculos inherentes al control de dimensiones de madera aserrada en el establecimiento Rigo Fuentes

Parámetros	Surtido			
	13 mm	50 mm	75 mm	100 mm
Grosor promedio, mm	13.81	56.39	83.95	108.31
Dimensión final, mm	13.00	50.00	75.00	100.00
Dimensión optima	18.37	60.25	84.80	113.50
Dimensión crítica	13.58	52.25	78.37	104.49
Desviación estándar dentro de las piezas, mm	2.76	4.21	3.72	4.47
Desviación estándar entre piezas, mm	0.90	2.40	1.19	3.13
Desviación estándar Total	2.90	4.85	3.90	5.46

Tabla 6. Resultados de los cálculos inherentes al control de dimensiones de madera aserrada en el establecimiento Alvaro Barba

Parámetros	Surtido			
	13 mm	50 mm	75 mm	100 mm
Grosor promedio, mm	12.38	47.50	79.79	102.44
Dimensión final, mm	13.00	50.00	75.00	100.00
Dimensión optima	16.81	58.60	85.79	111.68
Dimensión crítica	13.58	52.25	78.37	104.49
Desviación estándar dentro de las piezas, mm	1.11	2.18	3.89	2.74
Desviación estándar entre piezas, mm	1.61	3.17	2.28	3.39
Desviación estándar Total	1.96	3.85	4.50	4.36

Tabla 7. Resultados de los cálculos inherentes al control de dimensiones de madera aserrada en el establecimiento Francisco Donatien

Parámetros	Surtido			
	13 mm	50 mm	75 mm	100 mm
Grosor promedio, mm	13.28	53.39	76.21	102.48
Dimensión final, mm	13.00	50.00	75.00	100.00
Dimensión optima	16.70	57.84	83.86	108.96
Dimensión crítica	13.58	52.25	78.37	104.49
Desviación estándar dentro de las piezas, mm	1.09	2.51	2.93	2.21
Desviación estándar entre piezas, mm	1.54	2.27	1.57	1.58
Desviación estándar Total	1.89	3.39	3.33	2.71

Tabla 8. Resultados de los cálculos inherentes al control de dimensiones de madera aserrada en el establecimiento Tenería de Guane

Parámetros	Surtido		
	13 mm	50 mm	75 mm
Grosor promedio, mm	18.67	49.86	74.87
Dimensión final, mm	19.00	50.00	75.00
Dimensión optima	23.76	55.81	82.26
Dimensión crítica	19.85	52.25	78.37
Desviación estándar dentro de las piezas, mm	1.59	1.88	1.92
Desviación estándar entre piezas, mm	1.76	1.08	1.37
Desviación estándar Total	2.37	2.16	2.36

Por otra parte en las tablas antes relacionadas, se presentan los resultados relacionados con la variación total de aserrado; determinándose que la variación cambia de un surtido a otro, siendo notablemente mayor para los surtidos de 50, 75 y 100 mm; sin embargo es mucho menor para piezas se 13 mm de grosor, apreciándose que en el establecimiento Francisco Donatien es el de más baja variación total de aserrado (1,89 mm).

Como es lógico la gran variación del proceso de aserrado que se manifiesta en los surtidos 50, 75, 100 mm es resultado de las variaciones excesivamente grandes que ocurren dentro de las piezas y entre piezas. A este respecto, el análisis detenido de los datos de cada surtido permite emitir dos consideraciones fundamentales:

1. La gran variación de aserrado dentro de las piezas se debe no solo a las desviaciones excesivas de la hoja de sierra respecto a su trayectoria normal, sino también a la deficiente alineación de las escuadras del carro, lo que propicia la obtención de todas las piezas interiores (piezas pegadas a las escuadras del carro) con notable defecto de cuña hacia una sola dirección y de piezas exteriores (piezas

alejadas de las escuadras del carro) libres o aleatorias afectadas por este defecto hacia una u otra dirección.

Teniendo en cuenta que , de acuerdo con los esquemas de corte empleados en los aserraderos de banda, una proporción considerable de piezas de los surtidos 50, 75, 100 mm son interiores, es obvio que se espere de ellos una gran variación de aserrado dentro de las piezas debido a la incidencia de la cantidad relativamente grande de piezas con defectos de cuña hacia una dirección y/o la gran magnitud de este defecto en los surtidos ya mencionados en los aserraderos Rigo Fuentes, Alvaro Barba y Francisco Donatien. Contrariamente a esto, la madera aserrada del surtido 13 mm exhibirá menor variación dentro de las piezas ya que estas son afectadas apenas ligeramente y al azar por este defecto hacia ambas direcciones.

2. La gran variación de aserrado que se observa entre piezas, también en los surtidos 50, 75, 100 mm se debe no solo a la deficiencia de los mecanismos de ajuste de las dimensiones, sino también a las imprecisiones cometidas por el aserrador que en muchas ocasiones proyecta esquemas de cortes que tienden a subdimensionar o a sobredimensionar las piezas interiores, las cuales llegan a alcanzar grosores actuales de 5 mm o más por encima o por debajo del grosor promedio, según se ilustra en las tablas 11, 12, 13. Sin embargo, teniendo en cuenta que las piezas del surtido 13 mm son exteriores, la precisión en la asignación de dimensiones actuales es relativamente mayor, lo cual explica una menor variación entre piezas.

De lo anterior se deduce que la alineación adecuada de las escuadras del carro y la observación de precaución en la proyección de los esquemas de corte permite reducir de forma sensible la variación de aserrado en los surtidos 50, 75, 100 mm.

Para el caso del surtido 13 mm, teniendo en cuenta que la variación dentro de las piezas es notablemente superior a la variación entre piezas en el aserradero “Rigo Fuentes”, sucediendo lo contrario en los establecimientos “Alvaro Barba” y “Francisco Donatien”, la variación total del proceso en este surtido pudiera reducirse emprendiendo la acción correctiva fundamentalmente en aquellas partes de los equipos responsables de la variación dentro de las piezas (mantenimiento de las hojas de corte) en el primer caso, y responsable de la variación entre piezas (sistema

de retroceso y avance de las trozas en el carro, mecanismo de sujeción de las trozas en el carro entre otros) en el segundo caso, lo que igualmente, permitirá el incremento de la producción de madera aserrada a partir de la utilización de la misma cantidad de madera como materia prima.

Por otra parte, debemos establecer que el empleo del programa denominado “Control obtenido en esta investigación para la determinación de las dimensiones optimas de la madera aserrada (Figura 9) en dependencia de los diferentes factores analizados; así como el análisis de la variación de aserrado en los diferentes aserraderos cuestionados, ha demostrado que se trata de una herramienta factible y adecuada para tomar decisiones dirigidas a aumentar los rendimientos de madera aserrada.

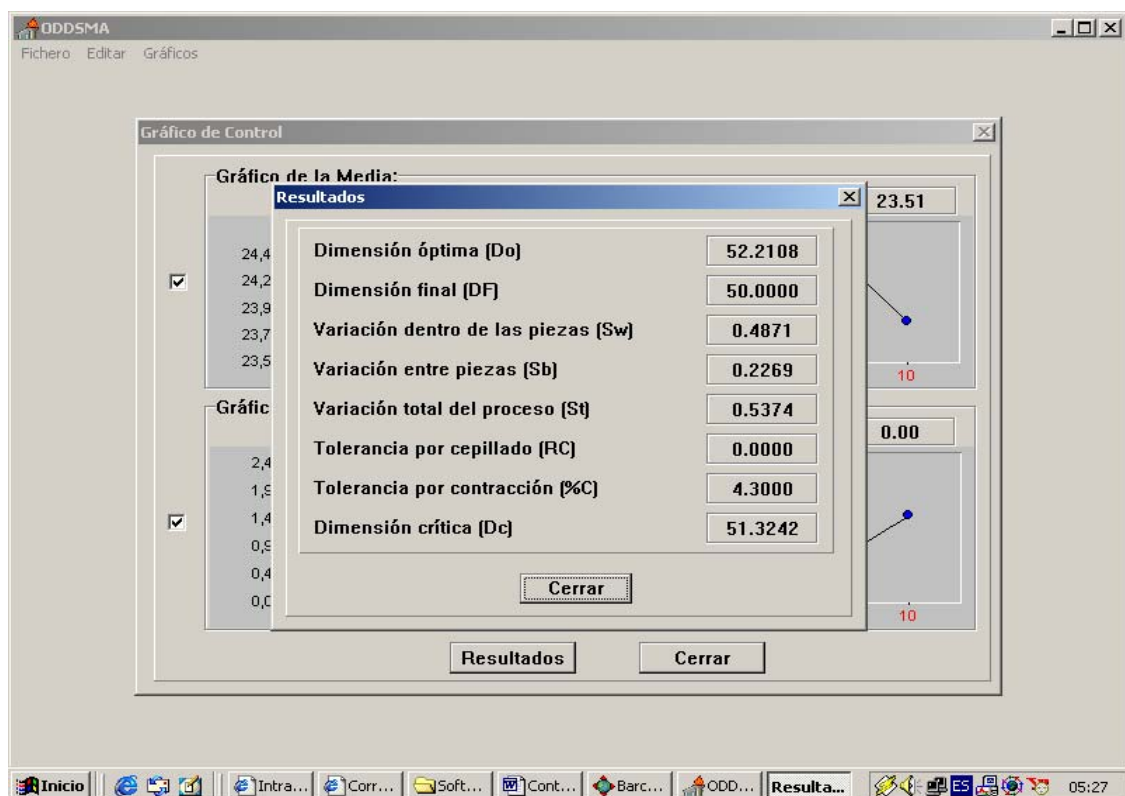


Figura 9. Elementos del programa “Control”

Por otra parte este programa crea condiciones para una mejor relación hombre-máquina lo que proporciona comodidad al usuario durante el trabajo, así como rapidez en el manejo de datos y ficheros; así como en la realización de los cálculos.

2. 4. TECNOLOGIA PARA LA PRODUCCION DE MUEBLES DE PIEZAS CONFORMADAS DE CHAPAS DE MADERA.

2. 4. 1 DETERMINACIÓN DEL RADIO DE CURVATURA PERMISIBLE.

En el proceso de diseño de los muebles (Figura10) es necesario conocer los radios permisibles a flexión a las piezas.



Figura 10. Mueble de piezas conformadas de chapas de madera

El radio máximo permisible a flexión de las chapas de madera durante la conformación de las piezas para muebles, depende de muchos factores, entre los que se destacan los siguientes:

- a) La especie de madera
- b) El grosor de la chapa
- c) Humedad de la chapa
- d) Características de resistencia y deformación

Por lo que la siguiente ecuación que posibilita determinar el radio máximo de flexión permisible de las chapas resume de alguna manera los factores antes señalados:

$$r = \frac{2 \cdot \delta E}{\sigma_{comp} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{tracc}}{\sigma_{comp}} \right)^2} \quad (19)$$

Donde

r- radio máximo de flexión permisible, mm

δ- grosor de la chapa, mm

E- modulo de elasticidad a la flexión, Mpa

σ_{comp}- resistencia a la compresión, Mpa

σ_{tracc}- resistencia a la tracción, Mpa

El radio permisible de flexión de la chapa influye sobre la curvatura de las piezas conformadas. La interrupción de la chapa en la superficie convexa se determina como un defecto de la pieza.

Tabla 9. Radios máximos de flexión de las chapas de madera

Especie	Grosor de las láminas		
	1, 00 mm	2, 00 mm	3,00 mm
<i>Pinus caribaea</i>	62,00	112,00	161,00
<i>Cedrela odorata</i>	41,00	90,00	120,00
<i>Eucalyptus saligna</i>	45,00	91,00	137,00

El análisis de la Tabla 9, permite deducir que las especies investigadas pueden utilizarse en la elaboración de piezas conformadas de diferentes perfiles. Elemento este muy significativo ya que es característica en los muebles modernos la presencia de elementos curvados.

Esta adaptabilidad de las chapas al proceso de conformación por concepto de curvatura posibilita reducir los gastos de madera durante el proceso de elaboración de muebles, aumentando además la productividad del proceso.

Para lograr mayor flexibilidad de las chapas durante la conformación de los paquetes, debemos lograr que las fibras de las chapas queden paralelas.

Se determinó además la influencia de las caras sobre la magnitud del radio de las chapas. La cara derecha no posee agrietamiento, es más resistente, por lo que se obtienen radios menores de flexión.

Queda establecido que la especie que permite radios de curvaturas más fuertes es *Cedrela odorata*; así como que las láminas de 1, 00 de grosor se adecuan con más efectividad al proceso tecnológico al permitir fuertes radios de curvatura y con ello la posibilidad por parte del diseñador de elaborar diseños de gran expresividad y plasticidad.

Entendemos por curvatura fuerte, al hecho de que en la misma su derivada supera en valor absoluto a la derivada de la función de menor curvatura.

Para una mejor comprensión de lo antes expuesto utilizaremos un modelo geométrico del caso, considerando las láminas a curvar como dos funciones $f(x)$ definida en $[a, b]$ y $g(x)$ en $[c, d]$, donde $[c, d]$ está contenido en el intervalo $[a, b]$, para el caso es claro que las funciones son continuas y derivables en sus respectivos intervalos de definición; \vec{F}_1 y \vec{F}_2 son dos fuerzas similares que se aplican en los puntos $(a, f(a))$ y $(b, f(b))$ para obtener una curvatura más fuerte transformando la función $f(x)$ en $g(x)$.

En la Figura 11, se aprecia lo expuesto anteriormente.

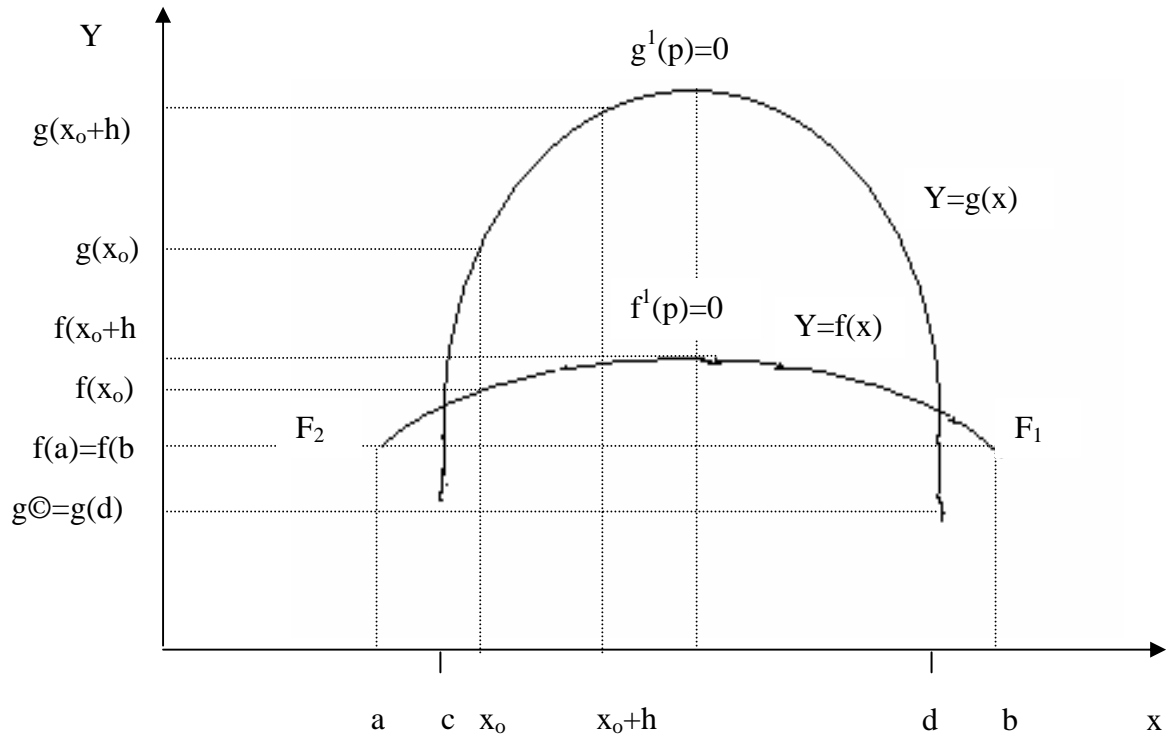


Figura 11. Representación gráfica de la curvatura de las láminas de madera

Como se puede apreciar en cualquier punto excepto (p) el modulo de la derivada de $g(x)$ superará al de $f(x)$ en el intervalo (c, d) o sea como:

$$\left| f'(x_0) \right| = \left| \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \right| \quad \text{y} \quad \left| g'(x_0) \right| = \left| \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x_0 + h) - g(x_0)}{h} \right| \quad (20)$$

Determinando que debido a la curvatura el modo de crecer $f(x)$ y $g(x)$ siempre tendremos que:

$$\left| f(x_0 + h) - f(x_0) \right| < \left| g(x_0 + h) - g(x_0) \right| \quad (21)$$

Por lo que

$$\left| g'(x_0) \right| > \left| f'(x_0) \right| \quad \text{para todo } x_0 \in (c, d) \text{ con } x_0 \neq p$$

2. 4. 2. NORMA DE RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS PIEZAS CONFORMADAS DE CHAPAS DE MADERA DE LAS ESPECIES INVESTIGADAS.

Esta resistencia normada se establece en la (Tabla 17). Las normas de resistencia pueden utilizarse en la organización del proceso productivo, control de la calidad y en los cálculos de diseños de muebles con el objetivo de obtener artículos de resistencia y durabilidad necesaria.

Tabla 17. Normas de resistencia de las piezas conformadas de chapas de madera.

Resistencia normada, MPa	<i>Pinus caribaea</i>	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>
Γ_{flex}	92,60	65,10	72,10
Γ_{comp}	32,70	33,10	33,10
Γ_{hien}	0,22	0,30	0,30

Los datos de esta tabla permiten regular y organizar el proceso de producción y los cálculos de los diseños de muebles para obtener piezas de una resistencia y estabilidad necesaria.

El análisis de estos datos permite establecer que las especies investigadas presentan resistencia mecánica acorde a las exigencias internacionales para la tecnología investigada. Esto es corroborado además si tenemos en cuenta que las magnitudes obtenidas están en los niveles de resistencia para la madera maciza.

Por otra parte es significativo mencionar que la resistencia de encolado y por tanto la facilidad de encolarse las especies es demostrado en el ensayo de resistencia a la hienda; quedando establecido que las especies cuestionadas se encolan correctamente. Aspecto este de gran importancia para la conformación de muebles de elevada resistencia y durabilidad.

Durante el desarrollo de los ensayos, las roturas durante el ensayo mecánico ocurren por la lámina de madera y no por la sección de resina sintética, aspecto este que demuestra que se obtuvo una buena unión entre la madera y la resina urea

formaldehído, demostrándose que un buen encolado supone una buena resistencia de las piezas y de la unión de resina, lo que es posible al formarse un fuerte enlace entre las partes unidas.

Se establece que la utilización de los materiales en general y en particular de la madera, está estrechamente relacionada con su comportamiento mecánico.

De forma general podemos concluir que las chapas de las especies investigadas pueden ser utilizadas en la producción de muebles de piezas conformadas.

2. 4. 3 RESISTENCIA DE LAS PIEZAS CONFORMADAS DE CHAPAS DE MADERA DE EUCALYPTUS SALIGNA EN DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA, PRESIÓN Y TIEMPO DE PRENSADO.

Los modelos obtenidos a partir de las matrices matemáticas, posibilitan científicamente optimizar el proceso tecnológico tomando como criterio fundamental la resistencia a la hienda (Γ_{hienda}). Al mismo tiempo otros índices de resistencia $\Gamma_{flexión}$ y $\Gamma_{compresión}$, deben ubicarse en el nivel de la madera natural. En este caso se utiliza el *Eucalyptus saligna*, por ser ésta una especie poco utilizada en el sector en Cuba.

Por lo que debemos analizar inicialmente el modelo mono factorial cuadrado

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_{11}x_1^2 \quad (22)$$

Factor x_1 varía en el diapasón -1 hasta $+1$. este modelo representa en sí la parábola con el extremo en un punto.

$$X_{1\text{ ext}} = b_1 : 2b_{11}$$

En dependencia de los signos de los coeficientes b_1 y b_{11} la forma de la curva varía.

Si $b_{11} = 0$, la parábola se convierte en una recta, que pasa por $Y = b_0$ (cuando $x_1 = 0$)

La parábola dada puede considerarse un polinomio de k factores. Si se investiga la influencia de un solo factor ($i = 1$) el resto de los factores ($k-1$) están estandarizados.

Las posibles soluciones para encontrar el extremo de la salida por el modelo monofactorial, están dados en la Tabla 2 en dependencia de la formulación de la tarea y de los signos en los efectos de interrelación.

Tabla 12. Soluciones para definir el extremo de la salida Y.

Búsqueda del máximo		Disposición $x_{i \text{ ext}}$		Búsqueda del mínimo	
		Entre la zona del experimento	Fuera de la zona del experimento		
b_{11}	b_1	$ b_i \leq 2 b_{ii} $	$ b_i > 2 b_{ii} $	$ b_{ii} $	b_{ii}
$b_{11} < 0$	$b_1 < 0$ $b_1 = 0$ $b_1 < 0$	$x_{i \text{ ext}}$	-1 - +1	$b_i > 0$ $b_i = 0$ $b_i < 0$	$b_{ii} > 0$
$b_{11} = 0$	$b_1 < 0$ $b_1 = 0$ $b_1 < 0$	$ x_i \leq 1$	-1 - +1	$b_i > 0$ $b_i = 0$ $b_i < 0$	$b_{ii} < 0$
$b_{11} > 0$	$b_1 < 0$ $b_1 = 0$ $b_1 > 0$	-+ $+1^*$; -1^* +1	-1 - +1	$b_i > 0$ $b_i = 0$ $b_i < 0$	$b_{ii} = 0$

* Dos soluciones concurrentes

La búsqueda de las condiciones óptimas del proceso tecnológico puede ser formalizada como bloque esquema.

Tabla 13. Niveles de variación de los factores empleados en la regulación mecánica de las piezas conformadas.

x_i	+1	0	-1
x_1 - Temperatura, °C	130	110	90
x_2 - Presión, MPa	1,2	0,8	0,4
x_3 - Tiempo, min/mm	12	8	4

Los resultados de los ensayos de resistencia de las piezas conformadas en dependencia de la presión, temperatura y tiempo de conformación permiten obtener los siguientes modelos matemáticos:

a) Resistencia a la Compresión

$$Y_{\text{comp}} = 7,79 - 25,76 x_1 + 1,88 x_3 + 25,05 x_1^2 - 3,25 x_2^2 + 2,32 x_3^2 \quad (23)$$

Donde x_1 - temperatura; x_2 - presión; x_3 - tiempo

b) Resistencia a la flexión

$$Y_{\text{flex}} = 26,13 - 49,96 x_1 + 2,23 x_3 - 41,58 x_1^2 - 4,16 x_2^2 - 2,46 x_3^2 - 5,49 x_1 x_3 \quad (24)$$

c) Resistencia a la hienda

$$Y_{\text{hienda}} = 0,21 - 0,16 x_1 + 0,06 x_1^2 - 0,05 x_2^2 \quad (25)$$

El análisis de los bloques esquemas (Figura 11a, b, c); posibilitando las significaciones de los factores que aseguren el máximo de resistencia.

La temperatura de conformación debe ser de 90 °C. Cuando la temperatura aumenta dentro del paquete, se produce la formación de una mezcla de vapor de gas. Todo esto aumenta la presión interna en el paquete, contribuyendo al crecimiento de la tensión, lo cual conduce a la ruptura del paquete, disminuyendo la resistencia.

La presión de conformación no debe ser muy alta y según el análisis de los modelos, así como los datos experimentales, es igual a 0,80 MPa. Altas presiones dificultan la salida del vapor y del gas sobrante en un paquete.

El tiempo de exposición oscila en los límites de 0,8 min/mm hasta 1,20 min/mm. No se recomienda aumentar el tiempo de exposición por encima de este diapasón, puesto que esto conduciría al aumento de la presión interna de gas y vapor del bloque y disminuiría la resistencia Tabla 14.

$Y = 7,79 - 25,76 x_1 + 1,88 x_3 + 25,05 x_1^2 - 3,25x_2^2 + 2,32x_3^2$
$W_1 = 25,76 x_1 + 25,05 x_1^2$
$W_2 = - 3,25x_2^2$
$W_3 = 2,32x_3^2$



$x_1 = -1; x_2 = 0; x_3 = 1$ $Y_{\max} = 62,80$

Figura 11a. Resistencia a la compresión de las piezas conformadas en dependencia de la temperatura, presión y tiempo de conformación

$Y = 26,13 - 49,96x_1 + 2,23x_3 - 41,58x_1^2 - 4,16x_2^2 - 2,46x_3^2 - 5,49x_1x_3$
$W_1 = - 49,96x_1 - 41,58x_1^2 - 5,49x_1x_3$
$W_2 = - 4,16x_2^2$
$W_3 = + 2,23x_3 - 2,46x_3^2 - 5,49x_1x_3$



$x_1 = -1$ $x_2 = 0$ $x_3 = 1$ $Y_{\max} = 128,42$

Figura 11b. Resistencia máxima a la flexión en dependencia de la temperatura, presión y tiempo de conformación.

Tabla 14. Resistencia máxima de las piezas conformadas en dependencia de la temperatura, presión y tiempo de exposición.

Parámetro de optimización	Temperatura, °C		Presión, Mpa		Tiempo de conformación, min/mm		Máximo de resistencia MPa
	Valor codificado	Valor natural	Valor codificado	Valor real	Valor codificado	Valor natural	
Γ_{comp}	- 1	90	0	0,80	1	1,2	62,80
$\Gamma_{\text{flexión}}$	- 1	90	0	0,80	1	1,2	128,42
Γ_{hienda}	- 1	90	0	0,80	0	0,8	0,43

BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, D. 1991. Optimización de la tecnología para la producción de muebles de piezas conformadas de láminas de *Eucalyptus* sp. Universidad de Pinar del Río. Cuba.

Egas, F. A, Alvarez, D Estevez, I, García, J. M. 2001. Factores fundamentales para aumentar el rendimiento volumétrico en los aserraderos de Cuba. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol VII (2) 163-168. México.

Alvarez, D; Egas, F. A, Estevez, I, García, J. M. 2003. Análisis matemático para elevar la eficiencia en los aserraderos. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.. No. IX 79-99

Alvarez , D,. et al. 2004. Elevación de la eficiencia en los aserraderos. Monografía. <http://monografias.com/trabajo17/trabajo>

Alvarez, D et al. 2005. Control de la calidad en los aserraderos. Revista Baracoa, Ciudad Habana, Cuba

Amaral, P. Verissimo, A. Barreto, P e Vidal, E. 1998. Floresta para sempre. Um manual para a produção de madeira na Amazônia. Belém, Pará, Brasil. 155 p.

Armstrong, S. 2000. RIL for real: introducing reduced impact logging into a commercial forestry operation in Guyana. International Forestry Review, 2 (1): 17-23.

Bertrand I. and Prabhakar M. 1990. Control de calidad. Teoría y aplicaciones. Ed. Díaz de Santos S.A. Madrid.

Bennett, E. L. & Robinson, J.G. 2000. Hunting of wildlife in tropical forests: implications for biodiversity and forest peoples. World Bank Biodiversity Series - Impact Studies 2. Word Bank Environment Department, Washington, D.C., USA.

Binagorov, G. S. 1984. Tecnología del aprovechamiento forestal. Editorial Industria Forestal. Moscow. p 201–2002

Brown, T. D. (1979). Determining lumber target sizes and monitoring sawing accuracy. Forest Product Journal. 29 (4): 48-54

Brown, T. D. (1986). Lumber size control. Forestry Business. College of Forestry. Oregon State University. USA. 16 pp.

Cándano, F.(2000). Os custos das operações de exploração. Monografia. Departamento de Engenharia Florestal, UFMT, Mato Grosso, Brasil. 37 p.

Casado, M. M. (1997). Tecnología de las industrias forestales. Tomo I. Serie Forestal 26. Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. 191 pp.

Denig, J. 1990. Control de la calidad en aserraderos de pino del sur. North Carolina Cooperative Extension Service. 47 pp.

Egas, A, F. 1998. Consideraciones para elevar los rendimientos en aserraderos con sierras de banda. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río, Cuba. 100 pp.

Fahey, T. D. & Sachet, J. K. 1993. Lumber recovery of ponderosa pine in Arizona and New Mexico. USDA Forest Service Paper PNW-RP-467. Pacific Northwest Research Station. Portland, Oregon. 18 pp.

Fosado, O. 1999. Tratamiento económico matemático de la planificación operativa del proceso de aserrado de la madera. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Forestales. Universidad de Pinar del Río. Pinar del Río, Cuba. 100 pp.

García, L; Guindeo, A; Peraza, C & De Palacios, P. 2002. La madera y su tecnología. Fundación Conde del Valle de Salazar y Ediciones Multiprensa. AITIM. Madrid. 322 p

Herrera, F. 1987. Tecnología para la producción de muebles de piezas conformadas de láminas de madera tropical. Editorial ENPES. La Habana. Cuba. 207 p.

Kollmann, F y Cote, W. 1963. Principles of Wood science and Technology Solid Wood". Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York.

Kostrikov. P. V. 1985. Tecnología de las piezas curvado-encoladas de chapas de madera de pino y elerce. Kishinev. Moldavia. 104 p.

Okay, R. 2001. Sawing characteristics and mechanical strength properties of branchwood of some Ghanaian timber species from sustainable managed forest. ITTO. Fellowship Report: Ref. 064/98A. 30 pp.

Patterson, D., H. Wiant, Jr. & G. B. Wood 1993. Comparison of the centroid method and taper systems for estimating tree volumes. North. J. Appl. For. 10 (1): 8-9

Steele, S and F. Wagner 1990. A model to estimate regional softwood sawmills conversion efficiency. Forest Products Journal. 40 (10): 29-34

Todoroki, C 1995. Log rotation effect on carriage sawing of sweep logs. New Zealand Journal of Forestry Science 25 (2): 246-255

Vignote, S.; Jiménez Peris, F. J. 1999. Tecnología de la madera. Ed. MAPA- Mundi-Prensa. Madrid. 242 p.

Vosnesenkiu, V. A. 1981. Métodos estadísticos de la planificación de los experimentos en las investigaciones técnico-económicas. Moscú. Rusia. 263 p.

Zabala, D. 1991. Manual para el establecimiento de un sistema de control de la variación de refuerzos en madera aserrada. Serie de apoyo académico. 44. Universidad Autónoma Chapingo. México. 49 pp.