CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

POSGRADO

“FACTIBILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS FORESTALES PARA SU PELLETIZACIÓN EN CIUDAD MADERA CHIHUAHUA”

“Tesis que como requisito para obtener el grado de maestra en ciencia y tecnología ambiental presenta:”

Mónica Moreno López

Director de tesis

Dr. Ignacio Ramiro Martin Domínguez

Asesor

Dra. María Teresa Alarcón Herrera

Chihuahua Chih. Julio 2011

AGRADECIMIENTOS

Dr. José Apolinar Cortes

Ing. Luis Felipe Holguín

C. Rosario López

C. Margarita Ríos

C. Jesús tapia

Dra. Myriam Verónica Moreno López

Q. Silvia Violeta Miranda

Ing. Alma Delia Rubio Gómez

Ing. Alejandro Benavidez

Tabla de contenido

Índice de tablas iv
Índice de Figuras y Graficas v
I. RESUMEN 1
II. ABSTRAC 2
III. INTRODUCCIÓN 3
1. Antecedentes 4
1.1. Desarrollo a nivel mundial de la industria del Pellet 4
1.2. Fuentes de materia prima para la fabricación de pellets 4
1.2.1. Residuos de aserraderos 5
1.2.2. Residuos industriales 5
1.2.3. Residuos urbanos 5
1.3. Impacto ambiental 6
1.3.1. Impacto ambiental de la madera 6
1.3.2. Impacto ambiental de las emisiones 7
1.3.3. Alternativas para mitigar el impacto ambiental 7
1.4 La calidad de los pellets 8
1.4.1 Lignina 8
1.4.2 Poder calorífico 9
1.4.3 Friabilidad de los Pellets 9
1.5. Usos de los pellets 10
1.6. Legislación 10
1.7. Equipos en los que se usan pellets como combustible 11
1.7.1 Quemado de pellets a nivel domestico 11
1.7.2 Quemado de pellets a nivel industrial 14
IV. OBJETIVO 16
1. Hipótesis 16
2. Objetivo general 16
3. Objetivos específicos 16
V. METODOLOGÍA 17

a). Cuantificación de los volúmenes de residuos de aserrín en Cd. Madera y determinación del potencial de materia prima existente para la fabricación de pellets. 17

b). Cuantificación de los residuos de madera generados por la industria en Chihuahua. 17

c). Caracterización del aserrín, construcción de un prototipo de pelletizadora manual y determinación del poder calorífico de los pellets elaborados. 17

d). Revisión bibliográfica de los procesos existentes en el mercado mundial para la producción de pellets. 18

e). Factibilidad técnica y económica para instalar una pelletizadora en el estado de Chihuahua México. 18

VI. RESULTADOS 19

a). Cuantificación del aserrín generado en Cd. Madera 19

b). Cuantificación de los residuos de madera generados por la industria en Cd. Chihuahua 25

c). Caracterización del aserrín generado en Cd. Madera 28

d). Etapas del proceso de producción de pellets de aserrín. 33

e). Factibilidad técnica y económica para instalar una pelletizadora en Cd. Madera Chihuahua 36

VII. CONCLUSIONES 43

VIII. TRABAJOS CITADOS 45

Índice de tablas

Tabla 1. Sitios visitados en Cd. Madera Chihuahua 19
Tabla 2. Empresas generadoras de residuos de tarimas de madera, encuestadas en la zona norte de Cd. Chihuahua 27
Tabla 3. Norma Alemana DIN Plus para pellets de alta calidad 29
Tabla 4. Maquinas Pelletizadoras 35
Tabla 5. Fabricantes de maquinaria para la industria pelletizadora 37
Tabla 6. Costos de mano de obra 38
Tabla 7. Costo de energía eléctrica 39
Tabla 8. Costo de producción y utilidad esperada 40
Tabla 9. Análisis de valor presente 41
Tabla 10. Recuperación de capital y viabilidad financiera. 42

Índice de Figuras y Graficas

Figura 1 Estufa de pellets vista exterior. Fuente: Totsolar.com 12
Figura 2 Estufa de pellets vista interna. Fuente: Totsolar.com 13
Figura 3 Caldera industrial, alimentada con pellets. Fuente: Pellet-Fuel Chile 15
Figura 4. Aserradero Los Pinos grupo eje 20
Figura 5. Aserradero Productos Forestales del Norte 20
Figura 6. Aserradero Productos Forestales Cota B 21
Figura 7. Aserradero El Durangueño 21
Figura 8. Aserradero El Manantial 22
Figura 9. Aserradero Ejido Madera 22
Figura 10. Aserradero Transportes y Materiales TyE 23
Figura 11. Aserradero Productos Silvícolas Aztlan. 23
Figura 12. Aserradero Maderas JR 24
Figura 13. Aserradero Ejido El Largo zona sur 24
Figura 14. Partes de prototipo de pelletizadora Manual 30
Figura 15. Molde lleno de aserrín 30
Figura 16. Prototipo de pelletizadora, acoplado en una prensa manual 31
Figura 17. Pellet saliendo del prototipo 31
Figura 18. Pellet de aserrín de Cd. Madera Chihuahua 32
Figura 19. Bomba calorimétrica marca Parr modelo 6772. Calorimetric Thermometer. 32
Figura 20. Pelletizadora (fuente: Direct Industry). 34
Figura 21. Bolsas de Pellets 35
Figura 22. Big bags de Pellets 36

Grafica 1. Numero de tarimas circulando por mes en la Cd de Chihuahua 26
Grafica 2. Tarimas Desechadas 26

I. RESUMEN

En el Estado de Chihuahua, en la región de Cd. Madera existen diversos aserraderos que generan constantemente grandes cantidades de residuos forestales (aserrín, astillas, viruta, escuadría), estos son considerados basura, ocupan espacio en sus instalaciones y representan un peligro de incendio en la temporada de verano. En esta tesis se presenta una alternativa de solución al problema antes mencionado: convertir los residuos forestales en pellets.

Con el fin de cuantificar, se encuestaron 10 de los aserraderos más significativos en Cd. Madera, resultando que generan 955 m^3 de aserrín por semana, proveniente de *pinus patula*. Paralelamente, se encuesto la zona industrial norte en la Cd. de Chihuahua, con el fin de cuantificar los residuos de tarimas de madera factibles a ser usadas como materia prima en la industria pelletizadora, se encontró que se están depositando en el relleno sanitario aproximadamente 1517 tarimas de madera al mes.

Se tomo una muestra representativa de aserrín, se caracterizo su contenido de C, H,O,N,S y se comprobó que cumplen con lo establecido en la norma DIN Plus para pellets de alta calidad. Una vez que se conto con estos resultados, se diseño y elaboro un prototipo de pelletizadora manual, basada en las características físicas que exige la norma antes mencionada, enseguida, se elaboraron pellets con el aserrín de Cd. Madera y se les realizo un análisis calorimétrico, el resultado fue un poder calorífico de 22.13 Mj/kg, este valor está muy por encima de lo esperado y significa que no es necesario combinar el aserrín de Cd. Madera con algún otro residuo.

Con fines informativos, se investigo el sistema de producción de una típica planta pelletizadora, así como a los fabricantes de maquinaria con disponibilidad para instalar una planta pelletizadora en Cd. Madera Chihuahua.

Se concluye que el aserrín generado en Cd. Madera cuenta con las características óptimas para producir pellets, sin embargo por el momento estos serian solo para comercializarse en el extranjero, ya que a pesar de existir un mercado potencial en Chihuahua y en general en el país, es necesario diseñar y construir calderas que funcionen específicamente alimentadas con pellets.

II. **ABSTRAC**

In the State of Chihuahua, in Madera City region there are several mills that consistently generate large amounts of wood waste (sawdust, chips, shavings, squaring), these are considered trash, taking up space in their facilities and pose a fire hazard in the summer season. This thesis presents an alternative solution to the above problem: turning wood waste into pellets.

In order to quantify, surveyed 10 of the most important mills in Madera City, resulting generated on average 95 m^3 of sawdust per week from *Pinus patula*. In parallel, surveyed the northern industrial zone in the city of Chihuahua, in order to quantify waste wood pallets feasible to be used as raw material in the pelletizer industry, found that being deposited in the landfill approximately 1517 wood pallets per month.

It took a representative sample of sawdust, was characterized content of C, H, O, N, S and found to comply with the provisions of DIN Plus for high quality pellets. Once you have these results, we designed and developed a prototype pelletizer manual, based on physical characteristics required by the standard mentioned above, once, were prepared with sawdust pellets of Madera City and they performed a calorimetric analysis the result was a calorific value of 22.13 MJ / kg, this value is much higher than expected and means that it is not necessary to combine Madera City ´s sawdust with some other residue.

For information purposes, we investigated the production system of a typical pelleting plant, as well as manufacturers of machinery available to install a wood pelleting plant in Madera City Chihuahua.

We conclude that the sawdust generated in Madera City has the best characteristics to produce pellets, but for the moment these would only be marketed abroad, and that although there is a potential market in Chihuahua and in general the country, it is necessary to design and build boilers running specifically fed pellets.

III. INTRODUCCIÓN

Del total de la superficie territorial de México, el 72% (141,7 millones de hectáreas) se encuentra dedicada a los distintos usos forestales. Por estados, el 81% de la producción forestal se localiza en cinco entidades federativas: Durango (31%), Chihuahua (21%), Michoacán (17%), Oaxaca (7%) y Jalisco (6%)

En el estado de Chihuahua en la región de Cd. Madera, existen diversos aserraderos que se dedican a la producción de madera aserrada. A lo largo de los años estas empresas han acumulado grandes cantidades de residuos forestales, tales como aserrines, cortezas, astillas, recortes y similares, que actualmente representan un problema ambiental, un peligro de incendio en la temporada de verano y además ocupan espacio en las instalaciones de cada productor. En este proyecto se presenta una alternativa de solución al problema mencionado anteriormente, proponiendo convertir los desechos de los aserraderos en un biocombustible, pellets. El pellet es un tipo de energía renovable que presenta un balance de CO_2 neutro. Se trata de un combustible de alto poder calorífico, para producir la misma cantidad de calor que otros combustibles 2kg de pellet equivalen a 1litro de gasoil aproximadamente (DIN 51900-1:2000).

Los pellets de madera son pequeños cilindros de aserrín comprimido, proveniente de astillas de madera y aserrín seco. Estos cilindros se obtienen a través de una alta presión aplicada a través de una matriz de aserrín sin ningún tipo de aditivo la lignina de la madera hace de aglomerante natural. En su forma natural, la lignina es un polímero tridimensional constituido principalmente por unidades fenilpropano polimerizadas al azar (C_9). Ésta naturaleza polimérica ha favorecido el desarrollo de aplicaciones en las cuales se ha explotado sus características estructurales, como por ejemplo, su uso como materia prima en la obtención de carbones activos, en resinas, pellets, briquetas, etc.

La humedad en los pellets es muy baja, así que, estas pequeñas píldoras de energía necesitan muy poco espacio de almacenamiento.

Los pellets de residuos de bosque son producidos y usados a escala global, ya que tienen un mayor potencial para reemplazar combustibles fósiles en la producción de calor y electricidad, (Vinterbâck 2004). Sin embargo en México no se ha desarrollado esta industria enfocada al aprovechamiento de los diferentes residuos madereros por lo que el objetivo de este trabajo es cuantificar los residuos forestales que se producen en la región de Ciudad Madera Chihuahua, con el fin de analizar la factibilidad técnica y económica de producir pellets. Los resultados proporcionaran la información básica para el desarrollo de una nueva industria en el norte de México, contribuyendo a la conservación de los combustibles fósiles, y al cuidado del ambiente.

1. Antecedentes

La madera es la materia prima energética que el hombre ha utilizado desde la antigüedad. Los pellets de madera, se concibieron en Estados Unidos de América a finales de los años 70, pero se utilizó en unos nichos muy reducidos durante dos décadas, cuando comenzó a despegar su mercado en Europa (Alibaba.com, 2011). Posteriormente resucitó el interés en Estados Unidos y consecuentemente en todo el mundo, los pellets, son el resultado de la valorización de residuos procedentes de la industria de la madera, principalmente aserraderos y fabricas de tratamiento de madera para muebles, puertas, parquet etc., en todas las etapas de producción, desde que la madera sale del monte hasta que se convierte en un producto final, 1/3 de esta se pierde como restos de corte y otros procesos, son estos restos, los que se usan como materia prima en las pelletizadoras para producir los pellets de madera, de tal forma que ningún árbol se tala para la producción de pellets, si no que se valorizan residuos.

1.1. Desarrollo a nivel mundial de la industria del Pellet

La búsqueda de fuentes de energía alterna, a los combustibles fósiles es motivo de investigación a nivel mundial, la producción de pellets de residuos de madera es una alternativa viable, actualmente la industria del pellet está desarrollada en Europa, EEUU, Canadá y en algunos puntos de América del sur.

Vinterbäck, (2004), elaboró un articulo con el resumen de la primer conferencia mundial de pellets, realizada en Estocolmo en el año 2002; en él concluye que la expansión de la industria del pellet es significativa con un estimado Europeo de 4-5 millones de toneladas los próximos 5 años. La demanda y la inversión en plantas de pellets en Europa siguen al alza a pesar de la crisis, Suecia es el principal consumidor de pellets del mundo con un 20% de la producción global, para atender a ese consumo, en el 2008 produjo 1.6 millones de toneladas e importó 300 millones. (Buehlmann, 2009), la demanda mundial de pellets energéticos se sitúa en un incremento constante entre el 8 y el 10 %, en Europa existen en la actualidad 450 plantas de producción de pellets, y muchos proyectos en construcción, se espera que los países donde se dé el mayor incremento sean Reino Unido, Dinamarca, Suecia y Alemania, el precio de los pellets se ha mantenido al alza en los últimos 7 años y no se vislumbra su caída ni siquiera por efectos de la crisis mundial. (Reali, 2011).

1.2. Fuentes de materia prima para la fabricación de pellets

Para fabricar pellets se puede usar prácticamente cualquier residuo de madera, siempre y cuando no haya sido previamente impregnada o tratada con algún químico nocivo para la salud y el ambiente (aceites, fungicidas, insecticidas,

hidrófugos, pigmentos etc). Las fuentes que se han considerado a la fecha son las siguientes:

- Residuos de aserraderos
- Residuos industriales
- Residuos urbanos

1.2.1. Residuos de aserraderos

El aserrín de coníferas es el biomaterial más comúnmente usado para la producción de pellets, la experiencia, indica que las propiedades de los diferentes biomateriales tienen influencia en la calidad final del pellet. Un estudio sistemático fue conducido por Samuelsson y colaboradores (2009), donde fueron variados 5 factores para 2 niveles designados, los factores fueron: especies de árboles (scots pine y norway spruce); lugar de origen (latitudes 57 y 64 grados norte); almacenamiento del aserrín (0 y 140 días); contenido de humedad (9 y 12%); y tratamiento de vapor (2 y 6 kg/h). dichos autores concluyeron que el contenido de humedad fue el factor que afecto la densidad de la corteza del pellet de aserrín de conífera mas significativamente y el tiempo de almacenamiento fue el factor que influencio la durabilidad mecánica significativamente.

Granada y colaboradores (2006), en el resultado de sus experimentos sugieren que la corteza de pino es el más sustentable producto para fabricar pellet, pero necesita de un quemador específico debido a los diferentes comportamientos de la combustión de las mezclas.

1.2.2. Residuos industriales

En la empresa John Deere los residuos de tarimas de madera (Pallets), son triturados y usados para la fabricación de pellets, los cuales son usados como combustible en sus calderas. (López 2010). De tal manera que está probado, que este tipo de residuos también se puede usar como materia prima en la fabricación de pellets, además del aserrín, y todo tipo de residuos forestales y agrícolas que cuenten con un cierto poder calorífico.

Cantidades grandes de residuos de madera recuperados de la industria de la construcción y actividades industriales son anualmente generadas en Suecia, dichos residuos son importados para utilizarse como una fuente de energía en bio-combustible para calderas. (Krook, 2004).

1.2.3. Residuos urbanos

Para examinar el potencial de los residuos forestales, se llevo a cabo un estudio regional en un área de 13 condados de Michigan, en dicho estudio se combinaron datos y análisis de muchos otros estudios. Los resultados sugieren que los residuos de madera y árboles urbanos ofrecen una cantidad modesta de biomasa

que podría contribuir significativamente a más bio-economías regionales y nacionales, que las existentes actualmente. La mejor utilización de los residuos de biomasa de madera y árboles urbanos podría ofrecer fuentes nuevas de bio-combustibles para generación de calor y reducir el consumo de combustibles fósiles, reducir costes de eliminación de los residuos y presión en bosques. (Mac Farlane, 2004).

Taylora y colaboradores (2009) en Australia, desarrollaron, un estudio para identificar si hay una diferencia entre la madera que se separa para reciclarse y la que es dispuesta en los rellenos sanitarios. Los resultados sugieren que la disponibilidad del reciclaje no depende de la cantidad de madera que hay en el relleno sanitario.

1.3. Impacto ambiental

Los residuos forestales obtenidos en la producción de la madera pueden ser clasificados en dos tipos: subproductos de las actividades de silvicultura y residuos del procesamiento de la madera, estos últimos por estar concentrados en un lugar determinado, su utilización resulta más factible y menos costosa. La elaboración de la madera incluye: aserrado, descortezado y despulpe, en estos procesos se producen determinados desechos o subproductos, como aserrín y pedazos de madera de pequeñas dimensiones (astillas, virutas), todos estos residuos, ocupan espacio en los aserraderos y representan un peligro de incendio en la temporada de verano, además de provocar alergias y enfermedades de tipo respiratorio en la población. Otra fuente de impacto ambiental provocado por los residuos de madera, son los desechos de tarimas (pallets), muebles viejos y residuos de podas de arboles urbanos, todos estos van a parar al relleno sanitario. Una alternativa para todos estos residuos, es usarlos como materia prima en la fabricación de pellets de madera para la alimentación de calderas.

1.3.1. Impacto ambiental de la madera

Las tarimas de madera o pallets, tienen una vida corta y consumen cantidades vastas de recursos, son también responsables del 2–3% del total de residuos en el relleno sanitario en los Estados Unidos, esto es a pesar del hecho de que existen tecnologías para ser re-usados, reciclados, convertidos a otros productos o usados como combustibles de caldera. (Buehlmann *et al.* 2009). En Australia los residuos de tarimas de madera del sector comercial e industrial, representan el 80% del total de los sólidos presentes en los rellenos sanitarios. (Taylora *et al.* 2009). Aproximadamente el 40% del uso de la energía primaria global y la emisión de CO_2 son relacionados a la producción, en las diferentes industrias. En Suecia los RWW (residuos de madera recuperados), por sus siglas en ingles, contienen concentraciones altas de arsénico, cromo, zinc, níquel y cobre, mientras los RWW importados contienen concentraciones altas de mercurio y cadmio; esto los hace

imposibles de reciclar, así que se usan materiales crudos y los de desecho son depositados en los rellenos sanitarios. (Krook, 2004).

No se han encontrado datos concretos sobre la cantidad de residuos de madera generados en México.

1.3.2. Impacto ambiental de las emisiones

El impacto que causan las diferentes emisiones, diariamente, es motivo de investigación a nivel mundial. Respecto a las emisiones generadas por la combustión de pellets, Fiedler y Persson (2008), desarrollaron cinco combinaciones de sistemas representando el rango de soluciones típicas, a través del modelado y la simulación obtuvieron como resultado, la reducción a la mitad de las emisiones si el calentador por pellets es combinado con sistemas de calentamiento solar. En un estudio Hekkert y colaboradores (2000), investigaron el potencial y coste-efectividad de la reducción de emisiones de CO_2 mediante la administración mejorada de uso de material para transporte empacado en Europa Occidental.

Las emisiones (CO, NO_x, SO_x) y la eficiencia de una caldera de pellets (40 kw), fue comparada en seis diferentes tipos de biomasa: carrizo canario, residuos de cascara de cítricos, cascara de girasol, turba, paja de trigo y pellets de madera. Las emisiones varían en función de las cargas operativas para cada tipo de pellet, los pellets de madera reportan emisiones más bajas en todos los parámetros, sin embargo la optimización específica para cada tipo de pellet es esencial para el uso eficiente del agro-pellet, en este tipo de calderas. (Verma V.K., 2011).

1.3.3. Alternativas para mitigar el impacto ambiental

Para mitigar el impacto ambiental generado por los residuos de madera, estos se pueden reciclar de varias formas:

- Fabricación de hojas de aserrín prensado para la elaboración de muebles.
- Usar los residuos de madera en la elaboración de compost.
- Usar los residuos de madera para producir pellets.

El aumento en el uso de biomasa de madera reciclada, es una estrategia para disminuir el impacto ambiental y las emisiones de gases de madera verde, (Krook, 2004).

Son numerosos los reportes científicos acerca de la utilización de los residuos de madera, en la elaboración de compost para la fertilización orgánica y el mejoramiento de los suelos en diferentes países. Compost es el producto de la mezcla de todos los desechos vegetales y animales con el objetivo de que sufran

la descomposición microbiana mediante fermentación, convirtiéndose, en un tiempo prudencial, en lo que se conoce como mantillo o humus. (Alvarez, 2009). Los muebles fabricados con hojas de aserrín prensado, también un día se convertirán en residuos, en la elaboración de compost, el aserrín solo forma parte de un proceso, en cambio en la producción de pellets, los residuos de madera son la materia prima, solo generan un poco de cenizas y procurando tener una combustión completa, las emisiones son mínimas.

1.4 La calidad de los pellets

Para que un pellet se considere de alta calidad, según las normas Europeas vigentes (DIN Plus, ÖNORM M7135, SS187120, CTI R04/05), debe tener un poder calorífico mayor a 16.9 Mj/kg, y la norma DIN Plus marca un poder calorífico mayor o igual a 18 Mj/kg. (Gregorio, 2006).

Existen dos clases de poder calorífico: Poder calorífico inferior (PCI), se denomina así cuando el agua resultante de la combustión se supone en estado de vapor con los demás productos de la combustión. Poder Calorífico Superior (PCS) o Poder Calorífico Bruto, cuando la combustión se efectúa a volumen constante y el agua formada en el curso de la combustión es condensada. (InnovaChile, 2011).

1.4.1 Lignina

Los principales componentes de la pared celular macromolecular, presentes en todas las maderas son: celulosa, hemicelulosa y lignina. La lignina contribuye a incrementar las propiedades de resistencia mecánica en los arboles, de tal manera que es la responsable de que el árbol permanezca en posición vertical, la cantidad de la lignina en las diferentes especies de madera es variable desde 20% a 40%. Hay aproximadamente 28% de lignina en la madera del tronco, 36% en la corteza y el 37% en las ramas de un peso en seco. Es el tercer polímero natural más abundante presente en la naturaleza después de la celulosa y la hemicelulosa. Se espera que la lignina juegue un papel importante como materia prima para la economía de base biológica del mundo, para la producción de productos biológicos y los biocombustibles.

Recientemente se desarrollo un estudio donde fueron analizados 17 tipos de pellets de aserrín, con el objetivo de correlacionar su contenido de lignina con su poder calorífico, se encontró una altamente significativa correlación entre el poder calorífico y el contenido de lignina en las muestras de pellets (Telmo & Lousada, 2011).

1.4.2 Poder calorífico

Para incrementar el poder calorífico de los pellets de aserrín, se ha considerado la combinación con residuos de más alto poder calorífico, a la fecha se han investigado los siguientes:

- carbón mineral y vegetal
- residuos agrícolas
- residuos de podas de jardines
- residuos industriales

En el 2008, Soto. y Núñez, fabricaron pellets de carbonilla de carbón vegetal y aserrín con similares características en peso, volumen y densidad, manteniendo como única variable la cantidad de aserrín y carbonilla en cada pellet. Obtuvieron la combinación optima con un 47.5% de carbonilla, con una ganancia energética de 24.25% respecto a un pellet de 100% aserrín.

Entre los biocombustibles más utilizados, caloríficos y rentables del mercado de biomasa, las aceitunas (olivas) ofrecen una excelente fuente energética, más allá del aceite de oliva. El hueso de aceituna, una vez extraído, secado y triturado, se utiliza como combustible, combinado con aserrín en la fabricación de pellets. (infomasa.com, 2011).

La mezcla de residuos maderables de la industria alimenticia, con residuos forestales puede ser considerada para aumentar el poder calorífico de los pellets. González (2004), usó como combustible pellets de 3 diferentes tipos de biomasa (tomate, oliva y cardo), combinados con residuos forestales. La mezcla optima fue tomate (75%) y residuos forestales (25%) con una eficiencia en la caldera de 92.4% para un flujo másico y corriente de 75% y 0% respectivamente.

1.4.3 Friabilidad de los Pellets

La friabilidad es el parámetro que regula la resistencia al quiebre y desgaste, se mide tomando una muestra de 100 pellets y dejándolos caer uno a uno, desde un metro de altura en un piso de cerámica, al finalizar se dividen los 100 pellets iniciales entre la cantidad de pellets en el suelo. Se considera una buena friabilidad a partir de 0.93%, es decir de 100 pellets, en el suelo cerámico solo 7 se rompen en 2 partes. (Soto, 2008).

La dureza de los pellets está relacionada con su contenido de humedad y por lo tanto con su densidad. Rabier y colaboradores (2006). Compararon diferentes métodos para la estimación de la densidad de las partículas de pellets y briquettes y aplicaron determinaciones de desplazamiento de líquidos y sólidos. Para la realización del experimento seleccionaron 15 tipos de pellets producidos en 5

diferentes países Europeos y todos ellos comercialmente disponibles, la humedad contenida en los pellets fue entre 6% y 10%. Las conclusiones mostraron que ambos métodos, desplazamiento de sólidos y desplazamiento de líquidos dan buenos resultados. Un ejemplo de combinación optima es 47.5 % de carbonilla y el resto de aserrín de pino, producen una friabilidad de 0.935. (Soto, 2008).

Pellets de madera a granel fabricados a partir de aserrín, fueron sometidos a flujo de aire en pruebas de laboratorio. Los pellets tenían un diámetro de entre 6 y 34 mm y tres diferentes tamaños de longitud: los cortos de 4 mm, los medianos de 4-6.7 mm y los largos con una longitud mayor a 6.7 mm. Los resultados muestran que los pelles más pequeños tienen la mayor resistencia al desgaste por el flujo de aire. (Yazdanpanah F., 2011).

1.5. Usos de los pellets

Los pellets pueden ser usados como combustible de calderas, para la generación de energía eléctrica, calentamiento de agua y aire, a nivel domestico y a nivel industrial.

La factibilidad de la utilización de los residuos forestales para la generación eléctrica depende de los volúmenes y los tipos de madera disponibles. (Lesme, 2010).

Morán y colaboradores (2003) desarrollaron una estufa pequeña de uso domestico, para producir calor y agua caliente, la cual optimiza su eficiencia cuando se usan pellets de lignocelulosa. A su vez, González (2004), desarrollo una caldera para calentamiento domestico de 11.6 kw, usando pellets como combustible.

La necesidad energética en los edificios residenciales, ha llevado al desarrollo de un modelo completo de micro-cogeneración, en donde se usan pellets de madera como combustible, para la generación de calefacción y agua caliente simultáneamente. (Thiers S., 2010).

1.6. Legislación

La “Recuperación de madera” se puede definir como el proceso de valorización de residuos de madera que engloba el transporte, almacenamiento, clasificación, limpieza y reducción de volumen para su posterior reciclado o aprovechamiento energético. En México la ley federal más importante, en materia ambiental, es la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Compete a la federación la expedición de Normas Oficiales Mexicanas y la vigilancia de su cumplimiento. Cabe destacar que en dicha Ley se considera a los residuos sólidos, tanto municipales como industriales, como la principal fuente de contaminación de los suelos, por lo que se establece la necesidad de prevenir y

reducir su generación, así como incorporar técnicas y formas para el reúso y reciclaje, su adecuado manejo y una disposición final eficiente.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGP y GIR) fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003, vigente con la última reforma publicada el 22 de mayo de 2006. Dicha Ley tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona a un medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

No existe en México, ninguna ley, norma o apartado, específico para ningún tipo de residuo maderero.

En EEUU, El Estado de Carolina del Norte en su legislatura, debatió una prohibición en la que regulaba la disposición de los residuos de tarimas de madera en los rellenos sanitarios, durante varios años ha aumentado la demanda de materia prima en los productores de abono y de instalaciones de compostaje, en algunas zonas de Estados Unidos, los residuos de madera se están generando sólo para exportación, esto llevo a que la demanda cayera además de la generación de subproductos como el aserrín y la corteza. Existe a su vez una presión de algunos estados de EEUU sobre derogar la prohibición del envió a relleno sanitario, de los restos de poda, incluida la madera. (Mac Farlane, 2004).

Por decisión de la Comunidad Europea n°2001/118/CE del 16 de enero de 2002, todos los residuos de madera tratados o manchados con sustancias peligrosas se registran en la lista de los residuos de la Comunidad Europea y se clasifican, según su naturaleza, bajo las secciones 03 01 04*, 17 02 04*, 19 12 06* y 20 01 37*, con un asterisco, lo que les confiere el estatuto de « Residuos Peligrosos » y (según una clasificación franco-francesa) «Residuos Industriales Peligrosos ». Por lo que no pueden ser usados en la fabricación de pellets. Actualmente, las cantidades catalogadas en Francia como residuos de madera clasificados como RIP, es de 400000 toneladas al año. La mitad de estos residuos de madera RIP corresponde a los residuos institucionales (Thermya, 2006).

1.7. Equipos en los que se usan pellets como combustible

Los pellets pueden ser usados tanto a nivel domestico como a nivel de microindustria y a nivel industrial, dependiendo de que se cuente con la infraestructura adecuada para su quemado bajo las condiciones ambientalmente aceptables.

1.7.1 Quemado de pellets a nivel domestico

La biomasa se utiliza a nivel domestico básicamente en instalaciones de calefacción como estufas, calderas y chimeneas, también hay en el mercado

algunos modelos de cocinas y hornos domésticos. La moderna tecnología de las estufas y calderas automáticas de pellets ha alcanzado el mismo nivel de automatización y confort que las calderas de gasoil o de gas (Figura 1 y 2), alcanzando los mejores niveles de rendimiento y disminución de emisiones. Existe una amplia gama de modelos de estufas de pellets en el mercado, las potencias van de 9 a 12 kw, que permiten calentar espacios de hasta 300 m^3. En cuanto a calderas la gama de potencias y modelos es también amplia y van de 25 hasta 500 kw.

Figura 1 Estufa de pellets vista exterior. Fuente: Totsolar.com

Figura 2 Estufa de pellets vista interna. Fuente: Totsolar.com

1. Depósito Pellets
2. Cóclea
3. Brasero en hierro fundido.
4. Resistencia eléctrica.
5. Hogar en hierro fundido.
6. Ventilador ambiente.
7. Salida aire caliente ventilación forzada.
8. Ventilación extractor del humo.
9. Asta-cepillo-tubos.
10. Cajón para la ceniza.

Las calderas y estufas de pellets extraen el combustible de la tolva o de un silo, mediante sistemas automatizados como un “tornillo sinfín” que adecua la

velocidad a la demanda de la caldera. También incorporan sistemas de encendido automático mediante una resistencia eléctrica y sistemas automáticos de limpieza de intercambiadores. (Totsolar-Termosun, La biomasa, el combustible limpio, ecológico y económico, 2011).

1.7.2 Quemado de pellets a nivel industrial

Al igual que para uso domestico la biomasa y los pellets se utilizan en instalaciones de calefacción colectivas para hospitales, escuelas, piscinas y también para industrias que requieran calor, tanto en forma de agua caliente como vapor, con análogas ventajas económicas respecto a la utilización de combustibles fósiles. (Totsolar-Termosun, La biomasa, el combustible limpio, ecológico y económico, 2011).

El principio de operación de las calderas de pellets industriales, es básicamente el mismo que en las calderas domesticas, solo que las calderas industriales incluyen un modulo que permite controlar procesos de encendido, manejo de las potencias y procesos de apagado, esto se obtiene a través de los diversos dispositivos instalados, tales como sensores de llama, temperatura, etc. (Figura 3) diseñados para sustituir a los quemadores de Diesel, GLP o gas natural en distintos procesos industriales, entre otros:

- Hornos panaderos
- Secadores con intercambiadores indirectos
- Industrias que requieren calor en sus procesos

(Chile, 2011)

Figura 3 Caldera industrial, alimentada con pellets. Fuente: Pellet-Fuel Chile

.

IV. **OBJETIVO**

1. Hipótesis

Los desechos forestales de la región de Ciudad Madera Chihuahua son técnica y económicamente factibles de industrializar mediante pelletización.

2. Objetivo general

Analizar la factibilidad técnica y económica del aprovechamiento de los residuos forestales para su pelletización en Ciudad Madera Chihuahua México.

3. Objetivos específicos

a). Cuantificar los volúmenes de residuos de aserrín en Cd. Madera y estimar la producción actual y futura para determinar el potencial de materia prima existente para la fabricación de Pellets.

b). Cuantificar los residuos de madera generados por la industria en Chihuahua que pueden ser fuentes de materia prima para pellets.

c). Caracterizar las muestras de aserrín, construir un prototipo de pelletizadora manual y analizar el poder calorífico de los pellets elaborados con las muestras de aserrín de Cd. Madera.

d). Examinar los procesos existentes en el mercado mundial para la producción de pellets.

e). Analizar la factibilidad técnica y Económica, para instalar una pelletizadora en el estado de Chihuahua México.

V. METODOLOGÍA

a). Cuantificación de los volúmenes de residuos de aserrín en Cd. Madera y determinación del potencial de materia prima existente para la fabricación de pellets.

La cuantificación de los residuos se llevo a cabo a través de una visita a Cd. Madera, en donde se encuestaron 10 de los aserraderos más significativos de la región, con el fin de conocer los volúmenes de aserrín que se generan constantemente, así como las características de los residuos y las expectativas de los propietarios de los aserraderos.

b). Cuantificación de los residuos de madera generados por la industria en Chihuahua.

Se visitaron y encuestaron las industrias generadoras de residuos de tarimas de madera en la zona norte de Ciudad Chihuahua, y se evaluaron los resultados para determinar la factibilidad de usar dichos residuos como complemento en la producción de pellets de aserrín.

c). Caracterización del aserrín, construcción de un prototipo de pelletizadora manual y determinación del poder calorífico de los pellets elaborados.

El contenido de humedad presente en el aserrín de Cd. Madera y su caracterización, se determino tomando una pequeña muestra en cada uno de los aserraderos encuestados, pero considerando que la madera utilizada es prácticamente la misma en todos los aserraderos, ya que ellos obtienen su materia prima en el mismo lugar, se opto por mezclar las muestras y por medio de cuarteo obtener una sola muestra representativa, ya que esto es lo que en realidad pasa en el proceso de pelletización, todo el aserrín se mezcla en la tolva en la entrada de la maquina pelletizadora.

Para determinar el contenido de humedad, se peso 4.1700g de muestra, se coloco en el horno de secado a 100ºc, pasadas 24h, se saco la muestra del horno y su peso fue 2.6998g.

*Contenido de humedad = ((peso inicial – peso seco)/peso seco)*100*

Se caracterizo el aserrín en el analizador elemental EA 1110 CHNS-O, con el fin de conocer el porcentaje de carbono, hidrogeno, oxigeno y nitrógeno presentes en la muestra, el contenido de azufre se determino por medio de espectrometría de emisión por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES).

Con base en los parámetros físicos requeridos en las normas Europeas, para que un pellet sea considerado de calidad, se diseño un prototipo de pelletizadora manual, el cual consta de tres partes:

- Un molde cilíndrico, con un orificio en el centro, de 10mm de diámetro y 60mm de longitud,
- Una tapadera del molde cilíndrico, que embona en el orificio central de 9 mm de diámetro.
- Una barra solida de 8mm de diámetro y 34mm de longitud.

El material utilizado es acero, y el prototipo se construyo por medio de un torno. Una vez que se conto con la pelletizadora manual terminada, se elaboraron pellets con el aserrín de Cd. Madera, a los cuales se les realizo un análisis calorimétrico en la universidad de Morelia, por medio de una bomba calorimétrica marca Parr modelo 6772 calorimetric thermometer.

d). Revisión bibliográfica de los procesos existentes en el mercado mundial para la producción de pellets.

Se recopilo información bibliográfica por medio de internet, sobre fabricantes de equipo relacionado con la fabricación manejo y empaque de pellets. Las principales variables que se tomaron en cuenta son las siguientes:

- Capacidad de los equipos.
- Factibilidad para que el fabricante instale el equipo en México.
- Costos.

e). Factibilidad técnica y económica para instalar una pelletizadora en el estado de Chihuahua México.

Se analizaron los resultados obtenidos en los puntos anteriores, para determinar la calidad del producto y la rentabilidad alcanzable.

La factibilidad de instalar una industria pelletizadora, se calculo, tomando en cuenta la inversión inicial necesaria, el costo de producción y la utilidad esperada.

VI. RESULTADOS

a). Cuantificación del aserrín generado en Cd. Madera

Se visito Cd. Madera Chihuahua, con el objetivo de obtener información de los aserraderos establecidos en esta región, el principal interés fue obtener un marco de referencia respecto a los volúmenes de desechos forestales (aserrín, astillas, viruta) que se manejan, se encontró que en promedio están produciendo 95.5m^3 por semana en cada uno de los 10 aserraderos visitados. Según las encuestas realizadas, todos los aserraderos de la región obtienen su materia prima de madera de pino colorado (*pinus patula*), proveniente del ejido maderero. En general los aserraderos trabajan todo el año, a excepción de que se presenten nevadas extremas o a que no lleguen a acuerdos económicos con los ejidos madereros que les surten su materia prima. Al preguntarles ¿qué hacen con su aserrín? todos contestaron que prácticamente lo regalan a REXCEL SA de CV (Paneles Ponderosa Chihuahua) ya que solo obtienen como beneficio económico el pago por los gastos de transportar el aserrín de Cd. Madera a Cd. Chihuahua (aproximadamente a 270 km) y claro que si les gustaría poder darle otro uso a sus residuos, y si obtienen un beneficio económico mucho mejor. Los dueños de los aserraderos opinan que la industria de la madera es un ciclo que nunca se va a acabar, teniendo cuidado de las reforestaciones y los incendios, por lo tanto, la producción de aserrín también es continua. En la Tabla 1, Figura 4-13 se presentan los resultados obtenidos en las encuestas realizadas, con la cuantificación de los residuos de aserrín generados en la zona.

Tabla 1. Sitios visitados en Cd. Madera Chihuahua

Nombre de aserradero	responsable	Ubicación	Producción de aserrín m^3 x semana
Los Pinos grupo eje	Eliseo Cota Castro	28º42´58´´ N 106º07´57´´W	200
Productos forestales del norte	Víctor Pereda	29º12´34´´N 108º08´26´´W	150
Productos forestales Cota B	Adán Cota Castro	29º12´52´´N 108º07´50´´W	150
El Durangueño	Iván Rosales Huerta	29º12´52´´N 108º07´50´´W	20
El Manantial	Julio Cesar Loya	29º12´48´´N 108º07´06´´W	20
Ejido Madera	Ernesto Molinar	29º12´23´´N 108º08´20´´W	40
Transportes y Materiales del norte TyE	Jesús Tapia	29º11´00´´N 108º06´54´´W	75
Productos silvícolas Aztlán	Jorge Salazar	29º11´01´´N 108º06´48´´W	100
Maderas JR	Javier Yáñez	29º11´00´´N 108º06´54´´W	100
Ejido El Largo zona sur	Guillermo Loya Castillo	29º11´03´´N 108º07´10´´W	100

Figura 4. Aserradero Los Pinos grupo eje

Figura 5. Aserradero Productos Forestales del Norte

Figura 6. Aserradero Productos Forestales Cota B

Figura 7. Aserradero El Durangueño

Figura 8. Aserradero El Manantial

Figura 9. Aserradero Ejido Madera

Figura 10. Aserradero Transportes y Materiales TyE

Figura 11. Aserradero Productos Silvícolas Aztlan.

Figura 12. Aserradero Maderas JR

Figura 13. Aserradero Ejido El Largo zona sur

b). Cuantificación de los residuos de madera generados por la industria en Cd. Chihuahua

Con el fin de conocer la cantidad de tarimas de madera circulando y tener una referencia del potencial de residuos madereros que podrían ser usados como complemento de materia prima en la industria pelletizadora, se encuestaron 31 empresas ubicadas en la zona norte de ciudad Chihuahua, los resultados se presentan en la Tabla 2.

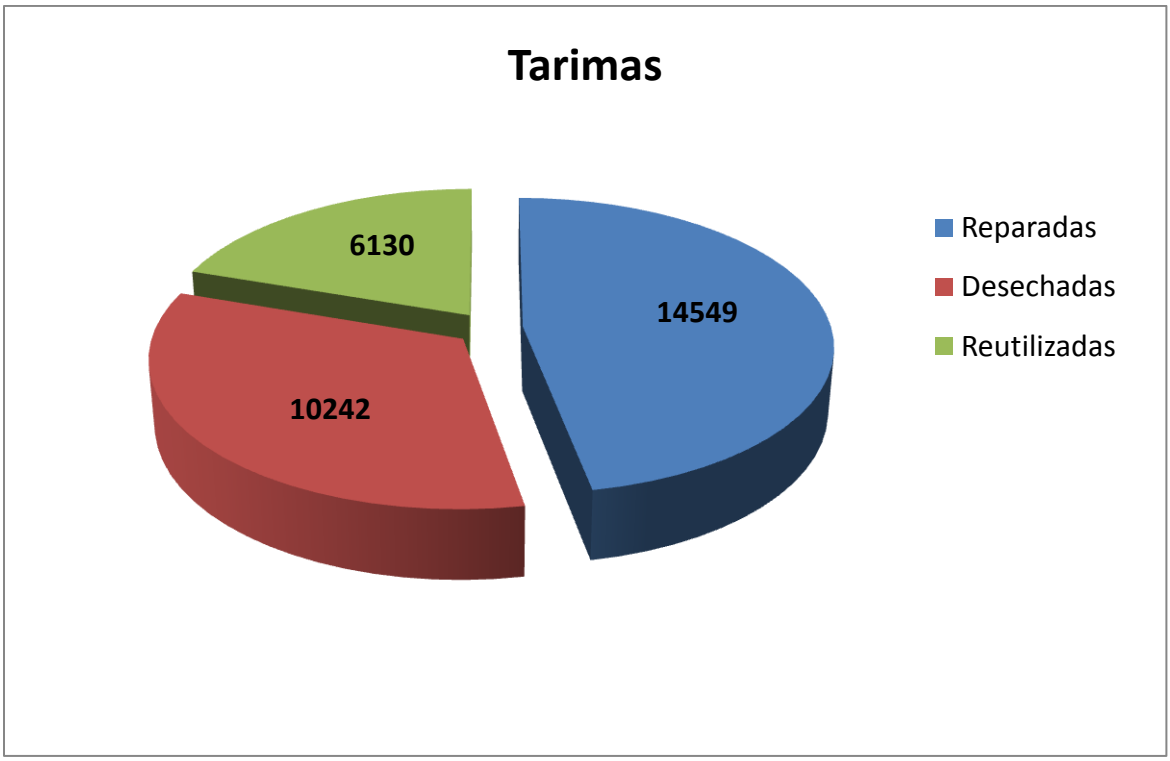
Se encontró que en un mes circulan en las diferentes empresas encuestadas 30921 tarimas aproximadamente, de las cuales 14549 deben ser reparadas y 10242 son desechadas. Grafica 1.

La empresa Coca-Cola está en proceso de cambiar sus tarimas de madera, por tarimas de plástico de tal manera que solo va desechando aproximadamente 70 tarimas por mes hasta que se terminen las 5000 piezas con las que cuenta.

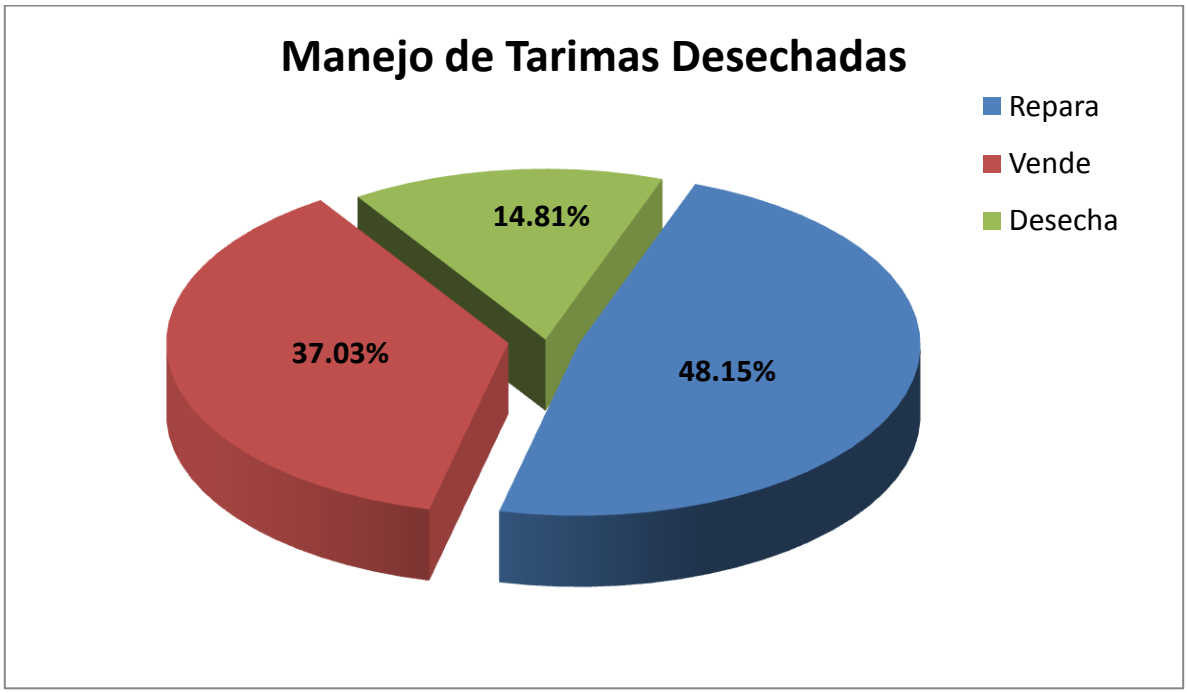
Del total de las tarimas desechadas, el 48.15% son reparadas, el 37.03% son vendidas y el 14.81% son depositadas en el relleno sanitario, generalmente estas últimas son recuperadas por las ladrilleras para usarlas como combustible. Grafica 2. En realidad este 14.81% equivalente a aproximadamente 1517 tarimas al mes, es lo que puede ser considerado como factible para materia prima de la industria pelletizadora.

Tarde o temprano todas las tarimas cumplen con su vida útil y al final van a parar a los tiraderos a cielo abierto, estas pueden ser recolectadas antes de llegar a este fin, de tal manera que se disminuya el impacto ambiental que estos residuos representan y poder darles un uso en la industria pelletizadora, cabe resaltar que para que se puedan considerar dichos residuos de tarimas de madera en la fabricación de pellets, estos no deben de tener ningún tipo de químico impregnado.

De las 31 empresas encuestadas, solo se han tomado en cuenta 27, ya que 4 empresas son transnacionales y por lo tanto no compran ni venden ni desechan sus tarimas en Chihuahua.



Grafica 1. Numero de tarimas circulando por mes en la Cd de Chihuahua



Grafica 2. Tarimas Desechadas

Tabla 2. Empresas generadoras de residuos de tarimas de madera, encuestadas en la zona norte de Cd. Chihuahua

Empresa	Utilizadas (Pza)	Reutilizada (Pza)	Desechadas (Pza)	Costo Reparación ($)	Costo Venta ($)	Desechadas en tierra
GCC-Cementera	10000	7000	3000	25	NO	NO
Interceramic	2700	1000	1700	60	NO	NO
Futurama	2000	800	1200	60	NO	NO
CON - MED	1200	0	1200	30	NO	NO
Labinal	1200	0	1200	30	NO	NO
GCC-Bloquera	2000	1500	500	26	NO	NO
America Beff Alimentos	3200	2800	400	25	8	NO
MONDI (sacos de papel)	1100	800	300	30	NO	NO
CARLISLE produc. De Mex	120	0	120	0	SI	NO
Buhler Motor Industrial	150	0	150	0	SI	NO
Refaccionaria Rogelio	80	0	80	0	SI	NO
Honeywell	1200	0	0	0	NO	NO
Coca Cola	5000	0	70	25	NO	NO
Teleflex Medical Arrow	60	0	60	25	NO	NO
Southco	50	0	50	30	NO	NO
Key Plastic de Mexico	40	0	40	0	SI	NO
Zodiac Air Cruseas	40	0	40	0	NO	SI
Walt Mark Nogales	35	0	35	0	SI	NO
ACC autoconectores	300	280	20	25	7	NO
Soriana	200	180	20	50	NO	NO
Pace Industries	50	35	15	0	7.5	NO
Sujetadores de Acero	100	88	12	0	10	NO
John Deere	60	50	10	0	NO	SI
FAWN de Mexico	10	0	10	0	NO	NO
TEXTRON internecional	4	0	4	0	NO	NO
Muebleria El Pasito	15	13	2	0	NO	SI
VOLVO de Chihuahua	5	3	2	0	15	NO
Mangueras y Productos	2	0	2	0	NO	SI
DANONE DE MEXICO	280	0	0	0	NO	NO
INTERNACIONAL PAPER	240	0	0	0	10	NO
FERRETERA REWO	3	3	0	0	20	NO
Suma	30921	14549	**10242**	48.15%	37.03%	14.81%
				Repara	Vende	Desecha

c). Caracterización del aserrín generado en Cd. Madera

El resultado de contenido de humedad fue 54.45%. Este es un parámetro muy importante y por lo tanto es indispensable conocerlo, el contenido de humedad debe ser de alrededor de 10%, si no es así, resulta imposible fabricar los pellets. (Tabla 3).

Para conocer la caracterización del aserrín, se analizo la muestra en el analizador elemental EA 1110 CHNS-O, se utilizo como material de referencia Cystina para calibrar el equipo, los resultados fueron:

- Carbono 53.323%
- Hidrogeno 6.747%
- Nitrógeno 0.040%
- Oxigeno 0.515%

El contenido de azufre en la muestra de aserrín fue de 0.002%, el cual se determino por medio de espectrometría de emisión por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES).

Dentro de los parámetros que marcan las normas para que un pellet sea considerado de calidad está el Nitrógeno ≤ 0.3% y el azufre ≤ 0.04, de tal manera que el aserrín de Cd. Madera esta dentro de la norma.

Una vez que se conocen el contenido de humedad y la caracterización del aserrín, se procede a diseñar y construir un prototipo de pelletizadora manual, con el fin de pelletizar la muestra. Para el diseño se toman como referencia los parámetros físicos requeridos por la norma Alemana DIN Plus para pellets de alta calidad. (Tabla 3).

Tabla 3. Norma Alemana DIN Plus para pellets de alta calidad

Caracteristicas	Unidad	Requerimiento
Diámetro (D)	mm	$4 \leq D \leq 10$
Longitud	mm	$\leq$ (5 D)
Densidad	kg/dm^3	≥ 1.12
Contenido Agua	%	≤ 10
Contenido Ceniza	%	≤ 0.5
Poder calorífico	MJ/kg	≥ 18
Contenido de azufre	%	≤ 0.04
Contenido nitrógeno	%	≤ 0.3
Contenido cloro	%	≤ 0.02
Desgaste	%	≤ 2.3

Se construyo un prototipo de pelletizadora manual, que consta de tres partes: el cilindro que es propiamente el molde del pellet, la tapadera y el tornillo compactador, (Figura 14).

La muestra de aserrín se seco al sol, durante aproximadamente 3h, hasta que su contenido de humedad fue de alrededor de 10%, no se puede fabricar pellets con aserrín húmedo, ya que al salir de la maquina pelletizadora, se desbaratan.

Para producir los pellets, se llena el molde con aproximadamente 2g de aserrín (Figura 15), se coloca en una prensa de mesa, manual y se le aplica presión hasta que el aserrín está bien compactado (Figura 16), enseguida se despresuriza la muestra, y se saca el pellet del molde (Figura 17 y 18).

Figura 14. Partes de prototipo de pelletizadora Manual

Figura 15. Molde lleno de aserrín

Figura 16. Prototipo de pelletizadora, acoplado en una prensa manual

Figura 17. Pellet saliendo del prototipo

Figura 18. Pellet de aserrín de Cd. Madera Chihuahua

Los pellets fabricados con el aserrín de Cd. Madera, se mandaron a la universidad de Morelia para la determinación del poder calorífico, el equipo utilizado en las mediciones de calor fue una bomba calorimétrica marca Parr modelo 6772 calorimetric thermometer, (Figura 19) el resultado fue un poder calorífico de 22.13 Mj/kg.

Según la literatura, el poder calorífico esperado de la madera de pino oscila entre 11 y 16 Mj/kg, así que obtener un poder calorífico de 22.13 Mj/kg no es un resultado común, pero coincide con lo reportado en el articulo “la madera como combustible” (Camacho, 2011) en donde se explica que de un contenido de carbono de 50%, se puede estimar un potencial calorífico de 5000 kcal/kg, el aserrín de Cd. Madera tiene un contenido de carbono de 53.323%.

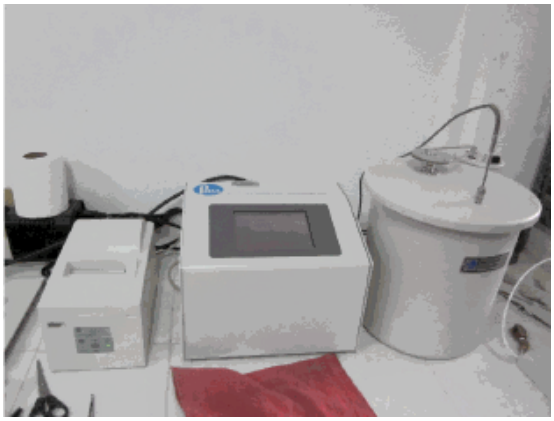


Figura 19. Bomba calorimétrica marca Parr modelo 6772. Calorimetric Thermometer.

d). Etapas del proceso de producción de pellets de aserrín.

Trituradora y molino:

Es importante triturar y moler la biomasa antes de introducirla en la peletizadora, es necesario llegar a una granulometría adecuada, inferior al diámetro del pellets que se desea fabricar, para obtener un pellets con buenas características físicas. En el caso de utilizar biomasa de origen agroforestal, es recomendable la utilización de una trituradora móvil a fin de reducir in situ el tamaño de las partículas, facilitando de esta manera el transporte, almacenamiento y secado natural.

Campana de biomasa:

Es el lugar donde se almacena la biomasa hasta el momento de procesarla, ésta no debe ser totalmente cerrada para que las corrientes de aire puedan ayudar al secado natural. Estos lugares temporales de almacenamiento se denominan CRAB (Centros de recogida y almacenamiento de biomasa).

Secado:

Cuando la biomasa se encuentra con valores de humedad elevados será necesario su secado hasta valores de humedad de alrededor de 10%.

Tolva de alimentación:

Actúa como deposito pulmón para evitar posibles paradas de la planta peletizadora.

Rosca de alimentación:

Generalmente se alimentará la peletizadora a través de un conducto desde la tolva. La rosca puede basarse en un tornillo sin fin o en un eje con palas de orientación variable, con el objetivo de modificar la velocidad de alimentación.

Pelletizado mediante prensa:

Es donde se realiza el proceso de densificación de la biomasa en la planta. Se hace pasar la biomasa a través de una matriz agujereada con la ayuda de rodillos giratorios que ejercen una presión constante sobre la matriz. La materia prima atraviesa la matriz al mismo tiempo que se comprime, obteniéndose a la salida un diámetro característico a la matriz empleada. A la salida de la matriz, un dispositivo compuesto de cuchillas, corta los cilindros, aún blandos, a la medida de la longitud deseada (figura 20).

Dispositivo de descarga de pellets:

El producto se depositará de tal manera de evitar su quiebre.

Enfriamiento:

Por enfriamiento de la lignina, ésta se endurece y los pellets adoptan la forma cilíndrica típica endurecida. El equipo enfriador se basa en una cámara vertical con ventiladores donde los pellets caen por la aplicación de un flujo transversal de aire suave para evitar que se produzcan fisuras. En esta etapa se consigue aumentar la dureza y resistencia del pellet, lo que permite evitar problemas en la manipulación de las etapas posteriores.

Tamizado y Clasificado:

Se realiza un tamizado con sistema de vibrado para separar el polvo que pudo haber escapado del proceso de peletizado, el cual es devuelto como materia prima al proceso de producción.

Almacenamiento y empaque:

Los pellets son transportados a un silo para almacenamiento, y finalmente pueden ser embolsados en bolsas de 15 a 20 kg o en Big Bags (desde 50 kg a 1000 kg) (Figuras 22 y 23). Estas bolsas pueden transportarse en pallets. En Europa los pellets también se venden a granel. (Maslatón Carlos, 2008), (Rodriguez, 2006).

Figura 20. Pelletizadora (fuente: Direct Industry).

En general actualmente existen en el mercado tres tipos de pelletizadoras industriales (Agroterra, 2011) especiales para densificar biomasas procedentes de producciones y residuos agroforestales: (tabla 4)

- Prensas pelletizadoras gama ligera
- Prensas pelletizadoras compactas alta gama profesional
- Prensas pelletizadoras Líneas completas

Tabla 4. Maquinas Pelletizadoras

Pelletizadora	Potencia cv	Rendimiento kg/h	Diámetro Pellets mm	Precio €
Gama ligera	10 - 40	50 - 500	4 – 6 – 8 – 10 - 12	2,640 a 6,990
Alta gama profesional	40 - 350	500 - 5000	6 - 30	8,800 a 144,000
Líneas completas	100 - 150	1000 - 20000	6 - 30	80,000 a 120,000

Figura 21. Bolsas de Pellets

Figura 22. Big bags de Pellets

e). Factibilidad técnica y económica para instalar una pelletizadora en Cd. Madera Chihuahua

La producción de una tonelada de pellets (7 – 10% de contenido de humedad) requiere el siguiente volumen de materia prima: (Rodriguez, 2006), (Maslatón Carlos, 2008).

- Alrededor de 7m³ de aserrín (con contenido de humedad del orden 50 – 55%) o

- Alrededor de 10m³ de virutas (con contenido de humedad del orden 10 – 15%)

Como ya se menciono, los aserraderos encuestados en la región de Cd. Madera generan 955 m^3 de aserrín por semana, con un contenido de humedad de 54%, lo que equivale a 136.4 toneladas de pellets por semana y 7092.8 toneladas de pellets al año, (considerando solo los 10 aserraderos encuestados). Las características encontradas en el aserrín de Cd. Madera son óptimas para la fabricación de pellets para usos energéticos.

Generalmente los costos de una típica planta pelletizadora incluyen tres componentes:

- Disponibilidad de materia prima
- Costo de instalación (inversión inicial)
- Costo de operación.

Disponibilidad de materia prima

El promedio en volumen de madera aserrada autorizado por año para el estado de Chihuahua es de 2, 408,600 m^3 r, de los cuales 1, 900,000 m^3 r corresponden a madera de pino, 490,600 m^3 r a especies de encino, 7,800 m^3 r a táscate, y el resto a otras especies. Los municipios con mayor volumen de aprovechamiento forestal maderable autorizado son: Madera, Guadalupe y Calvo y Guachochi, con el 23.1%, 18.7% y 12.5% respectivamente (Martinez, 2010).

Considerando que según la experiencia de los dueños de los 10 aserraderos encuestados, de cada rollo de madera, 1/3 se convierte en residuo, se puede estimar que el estado de Chihuahua cuenta con suficiente potencial de materia prima para instalar una pelletizadora.

Costo de instalación

Existen en el mercado mundial una gran cantidad de empresas dedicadas a la fabricación e instalación de maquinaria y equipo para la industria pelletizadora, con el fin de obtener una referencia acerca de costos, se solicito cotizaciones a cinco diferentes empresas, tomando en cuenta su factibilidad de instalación en México, las capacidades de producción de su maquinaria y la potencia requerida por cada pelletizadora línea completa. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Fabricantes de maquinaria para la industria pelletizadora

Empresa	Capacidad de producción ton/h	Potencia requerida kW	Costo Maquinaria $
Jiangsu Liyang Weifeng Equipment Co; Ltd MZLH420	1	97	1,562,340.00
Xin Xiang Heng Fu Electronic Machinery Co, Ltd	1	106.5	1,016,040.00
ZHANGQIU FADA PELLET MACHINERY CO; LTD	2	161.5	1,092,000.00
ININSO, S.A.	2.5	248	3,960,000.00
TALLERS CUÑAT	2.5	232.75	7,238,821.00

Costo de operación

Según lo reportado en la literatura, en una típica planta pelletizadora se ocupan solo entre 8 y 14 empleados dependiendo del tamaño de la planta (Uasuf, 2011), para calcular el costo de operación de la mano de obra requerida se tomo como base la tabla de sueldos y salarios vigentes en el estado de Chihuahua, que marca un salario mínimo diario de $56.7 y para empleados operadores de maquinas para madera en general de $78.85, el salario del ingeniero a cargo de la empresa se estima en $300 diarios, considerando solo 8 empleados por turno laboral de 8 horas (5 obreros, 2 técnicos y 1 gerente), los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Costos de mano de obra

Empresa	# horas de trabajo/día	# de Obreros	# de Técnicos	# de Gerentes	Salario Obreros por mes $	Salario Técnicos por mes $	Salario Gerente por mes $	Total salarios por mes $	Total salarios por año $
Jiangsu Liyang Weifeng Equipment Co; Ltd MZLH420	24	15	6	3	25,515.00	14,193.00	27,000.00	66,708.00	800,496.00
Xin Xiang Heng Fu Electronic Machinery Co, Ltd	24	15	6	3	25,515.00	14,193.00	27,000.00	66,708.00	800,496.00
ZHANGQIU FADA PELLET MACHINERY CO; LTD	16	10	4	2	17,010.00	9,462.00	18,000.00	44,472.00	533,664.00
ININSO, S.A.	8	5	2	1	8,505.00	4,731.00	9,000.00	22,236.00	266,832.00
TALLERS CUÑAT	8	5	2	1	8,505.00	4,731.00	9,000.00	22,236.00	266,832.00

.

En el estado de Chihuahua el costo de la energía eléctrica por 1,2 o 3 hilos de corriente comercial es de $49.51 cuota fija al mes, a los primeros 50 kW·h consumidos se les aplica una tarifa de $2.09, a los siguientes 50 kW·h se les aplica una tarifa de $2.53 y a el resto de kW·h utilizados se les aplica una tarifa de $2.78, más el IVA y el 5% por derecho de alumbrado público (DAP), el desglose de costos se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Costo de energía eléctrica

	Jiangsu Liyang Weifeng Equipment Co; Ltd MZLH420	Xin Xiang Heng Fu Electronic Machinery Co, Ltd	ZHANGQIU FADA PELLET MACHINERY CO; LTD	ININSO, S.A.	TALLERS CUÑAT
Potencia requerida kW	97	106.5	161.5	248	232.75
Gasto energetico por mes kW	60528	66456	67184	51584	48412
Costo de los 1º 50 kW·h ($)	104.50	104.50	104.50	104.50	104.50
Costo de los sig 50 kW·h ($)	126.50	126.50	126.50	126.50	126.50
Costo de los kW·h restantes ($)	167,989.84	184,469.68	186,493.52	143,125.52	134,307.36
Cuota fija al mes $	49.51	49.51	49.51	49.51	49.51
Total costo kW·h ($)	168,270.35	184,750.19	186,774.03	143,406.03	134,587.87
IVA 16% ($)	26,923.26	29,560.03	29,883.84	22,944.96	21,534.06
DAP 5% ($)	8,413.52	9,237.51	9,338.70	7,170.30	6,729.39
Costo de CFE por mes $	203,607.13	223,547.73	225,996.57	173,521.29	162,851.32
Costo de CFE por año $	**2,443,285.56**	**2,682,572.76**	**2,711,958.84**	**2,082,255.48**	**1,954,215.84**

El cálculo total de costo de operación y la utilidad esperada se muestran en la tabla 8.

La tonelada de Pellet de Madera se está pagando actualmente:

EXW US$ 110

FOB US$ 160

CIF US$ 240

EXW. En puerta de Fábrica, es decir que el vendedor se compromete a entregar la mercadería y el comprador paga el transporte desde la planta hasta el destino final.

FOB. Libre a Bordo, es decir que en este caso el vendedor paga todos los costos de transporte interno hasta puerto de Bs.As., Aduana, impuestos servicios portuarios y se entrega sobre barco y el comprador se hace cargo del transporte internacional hasta el destino final.

CIF. Transporte y seguro, es decir que en este caso el vendedor se hace cargo también del transporte internacional y el seguro hasta el puerto de destino. Esta es la más compleja para el vendedor pero es la que las empresas marítimas prefieren y los clientes Europeos también (Kenshiro, 2010).

Tabla 8. Costo de producción y utilidad esperada

Empresa	Total salarios por mes $	Costo de CFE por mes $	Costo de producción por mes $	Producción por mes (ton)	Precio de venta por mes EXW $	Utilidad esperada por mes $
Jiangsu Liyang Weifeng Equipment Co; Ltd MZLH420	66,708.00	203,607.12	270,315.12	624	823,680.00	553,364.88
Xin Xiang Heng Fu Electronic Machinery Co, Ltd	66,708.00	223,547.73	290,255.73	624	823,680.00	533,424.27
ZHANGQIU FADA PELLET MACHINERY CO; LTD	44,472.00	225,996.58	270,468.58	832	1,098,240.00	827,771.42
ININSO, S.A.	22,236.00	173,521.30	195,757.30	520	686,400.00	490,642.70
TALLERS CUÑAT	22,236.00	162,851.32	185,087.32	520	686,400.00	501,312.68

Anualizando costos y trayéndolos a valor presente P = A (P/A,i,n), considerando una tasa de interés del 5% representativa de la inflación histórica en México y una vida útil de 10 años (Tarquin, 2006). Se tiene:

$$(P/A,i,n)= [(1+i)^n - 1] / [i(1+i)^n]$$

El análisis de valor presente muestra que la mejor opción de compra seria la pelletizadora línea completa de ININSO S.A. los resultados se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Análisis de valor presente

Empresa	Costo Maquinaria $	Costo de producción por año $	Valor presente $
Jiangsu Liyang Weifeng Equipment Co; Ltd MZLH420	1,562,340.00	3,243,781.48	26,609,847.45
Xin Xiang Heng Fu Electronic Machinery Co, Ltd	1,016,040.00	3,483,068.76	27,911,252.04
ZHANGQIU FADA PELLET MACHINERY CO; LTD	1,092,000.00	3,245,622.92	26,153,726.50
ININSO, S.A.	3,960,000.00	2,349,087.56	22,098,949.41
TALLERS CUÑAT	7,238,821.00	2,221,047.87	24,389,086.34

Recuperación de capital y viabilidad financiera

La recuperación de capital y la viabilidad financiera se determina por medio de las siguientes formulas: (Tarquin, 2006)

$$RC = - [P(A/P\ i\ n)]$$

Donde:

RC= Recuperación de capital

n= Es el tiempo de vida útil del equipo (en este caso igual a10 años)

P= El costo de la maquinaria (inversión inicial)

(A/P i n)= 0.12950 es el factor tomado de tablas para una recuperación de capital con 5% de interés y un tiempo n igual a 10 años.

Los resultados se muestran en la tabla 10.

VA= -RC + Ingreso neto equivalente

Donde:

VA= Viabilidad financiera

RC= Recuperación de capital

Y el ingreso neto equivalente se calcula con la diferencia entre los ingresos y los costos. Los resultados se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Recuperación de capital y viabilidad financiera.

Empresa	Costo Maquinaria $	Costo de producción por año $	Precio de venta por año EXW $	Recuperación de capital $	Viabilidad financiera $
Jiangsu Liyang Weifeng Equipment Co; Ltd MZLH420	1,562,340.00	3,243,781.48	9,884,160.00	202,323.03	6,438,055.49
Xin Xiang Heng Fu Electronic Machinery Co, Ltd	1,016,040.00	3,483,068.76	9,884,160.00	131,577.18	6,269,514.06
ZHANGQIU FADA PELLET MACHINERY CO; LTD	1,092,000.00	3,245,622.92	13,178,880.00	141,414.00	9,791,843.08
ININSO, S.A.	3,960,000.00	2,349,087.56	8,236,800.00	512,820.00	5,374,892.44
TALLERS CUÑAT	7,238,821.00	2,221,047.87	8,236,800.00	937,427.32	5,078,324.81

La columna de recuperación de capital en la tabla 10 muestra la cantidad necesaria de ingreso al año para recuperar la inversión en 10 años, la columna de viabilidad financiera muestra que en todos los casos el negocio es viable y por lo tanto se justifica la inversión, siendo la mejor opción la empresa ZHANGQIU FADA PELLET MACHINERY CO; LTD, y esto se debe a que produce más toneladas de pellets que las demás empresas analizadas, este resultado coincide con lo reportado en la literatura, (Rodriguez, 2006) donde se explica que a mayor producción se esperan menores costos.

En la tabla 10 también se puede apreciar que a excepción de la empresa TALLERS CUÑAT, en todos los casos la inversión inicial se recuperaría en menos de un año.

VII. **CONCLUSIONES**

- La cantidad de aserrín generada solo por los diez aserraderos encuestados, es suficiente para que el negocio de la pelletización sea costeable, se puede concluir, que es factible producir por lo menos 2.5 ton/h.
- Considerando las grandes cantidades de residuos de madera que genera la industria en Chihuahua, es posible considerarlos como un complemento de materia prima en la industria pelletizadora, con esto se estaría mitigando el impacto ambiental que representan dichos residuos al ser depositados a cielo abierto, o al ser usados como combustible en las ladrilleras.
- Al analizar el aserrín generado por los aserraderos en Cd. Madera Chihuahua (*Pinus Patula*), se encontró que cuenta con un poder calorífico de 22.13 Mj/kg, este no es un resultado común, ya que según la bibliografía, el máximo poder calorífico esperado para la madera de pino es de 16 Mj/kg, sin embargo al caracterizar el aserrín resulto un contenido de Carbono de 53.323%, este es el motivo del alto poder calorífico presente en el aserrín de Cd. Madera. El poder calorífico es el parámetro más importante, ya que de no contar con la cantidad requerida por las normas, se deben hacer combinaciones con otros residuos de más alto poder calorífico, esto representa un costo en tiempo y dinero. Los porcentajes de Hidrogeno, Oxigeno, Nitrógeno y azufre también cumplen con lo especificado en normas, De tal manera que se puede concluir que el aserrín generado en Cd. Madera, cuenta con las características optimas, según la norma DIN Plus para pellets de alta calidad.
- El uso de pellets como combustible de caldera, es una práctica común en Europa, EEUU, Canadá y en algunas partes de Asia, En países como Suecia, Austria, Alemania, entre otros, el uso de pellets de madera esta tan generalizado, que su producción no es suficiente para cubrir su demanda, entonces se ven en la necesidad de importarlos, este es el motivo de que países como Argentina y Chile ya cuenten con la industria pelletizadora bien establecida. En México, específicamente en el estado de Chihuahua, se cuenta con la materia prima para fabricar pellets de alta calidad, sin embargo no existe un mercado desarrollado dentro del país, ni una cultura donde se fomente el uso de combustibles alternos, ya que actualmente son más costosos que los combustibles fósiles. Sin embargo está bien documentado que el mercado del pellet va a la alza con un crecimiento exponencial, por lo tanto es un buen negocio producir pellets y posicionarse en el mercado extranjero.
- En este proyecto se recopilo información sobre fabricantes de maquinas pelletizadoras, se desarrollo un análisis financiero y .se concluyo que si

existe la factibilidad económica para instalar una pelletizadora en la región de Cd. Madera Chihuahua, ya que se obtendrían atractivas utilidades y se estaría recuperando la inversión inicial en menos de un año.

- Para estimular el mercado del pellet dentro del estado de Chihuahua y dentro del país, es necesario diseñar y construir las calderas apropiadas para cada uso, que funcionen específicamente con pellets de aserrín.

La revalorización económica de los desperdicios de madera, convertirían a éstos en subproductos valorizados por la mejora del medio ambiente, la rentabilidad y la competitividad de las empresas. A su vez, es preciso aclarar que una planta de fabricación de pellets de madera debe localizarse cerca de donde se genera la materia prima (residuos) para evitar los costos relacionados con la logística del abastecimiento, la distribución, el almacenamiento y la manipulación.

VIII. **TRABAJOS CITADOS**

1. Agroterra. (2011). *Agroterra.com*. Recuperado el 24 de mayo de 2011, de http://www.agroterra.com/search?q=pelletizadoras.

2. Alibaba.com. (2011). *Pellets de madera para combustible.* Recuperado el 19 de abril de 2011, de http://spanish.alibaba.com/product-free/wood-pellet-fuel-259101925.html.

3. Alvarez, E. (2009). *ECO PORTAL.NET.* Recuperado el 01 de marzo de 2011, de http://www.ecoportal.net/Temas_Especiales/Educacion_Ambiental/Aprovechando_los_Residuos_Madereros.

4. Buehlmann, U. B. (2009). Ban on landfilling of wooden pallets in North Carolina: an assessment of recycling and industry capacity. *ELSEVIER Journal of Cleaner Production* , 17:271-275.

5. Camacho, A. (2011). *La Madera como Combustible (infomadera.net)*. Recuperado el 20 de mayo de 2011, de http://www.infomadera.net/uploads/articulos/arch.

6. Chile, P.-F. (2011). *http://www.pellet-fuel.cl/quemadores_de_pellet/.* Recuperado el 20 de abril de 2011

7. Darron, W. D. (2009). Curran Types of packaging wastw from secondary sources (supermarkets). *ELSEVIER The Situation Waste Management* , 1198-1207.

8. Di Giacomo, G. T. (2008). Renewable energy benefits with conversión of woody residues to pellets. *Energy* , 34: 724-731.

9. Fiedler, F. P. (2008). Carbon monoxide emissions of combined pellet and solar heating systems. *Applied energy* .

10. Gonzalez, J. (2004). Combustion optimization of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler. *Biomass & Bioenergy* .

11. Granada, E. L. (2006). Feasibility study of forest residue use as fuel through CO-firing with pellet. *Biomass & Bioenergy* , 30: 238-246.

12. Gregorio, A. G. (2006). *Fundación CARTIF.* Recuperado el 05 de Abril de 2011, de Normalización y estandarización de los pelets: http://www.inti.gob.ar/ue/pdf/normativa_biocombustibles.pdf

13. Hekkert, M. J. (2000). Reduction of CO2 emissions by improved management of material and product use: the case of transport packaging. *ELSEVIER Resources, Conservation and Recycling* , 30: 1-2.

14. infomasa.com. (2011). *Huesos de Aceituna / Biocombustibles económicos y rentables para consumo particular e industrial.* Recuperado el 27 de febrero de 2011, de http://infobiomasa.com/huesos-de-aceituna-biocumbustibles-economicos-y-rentables-para-consumo-particular-e-industrial/.

15. InnovaChile. (2011). *http://www.gestionforestal.cl:81/boldo/silviculturaymanejo/silman_tecnologia.htm*. Recuperado el 25 de abril de 2011

16. Kenshiro. (29 de Diciembre de 2010). *empresores.com*. Recuperado el 27 de Junio de 2011, de http://www.empresores.com/foros/32869-bioenergia-de-exportacion-partir-del-aserrin-2.html.

17. Krook, J. M. (2004). Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden. *ELSEVIER Resources, Conservation and Recycling* , 41: 1-14.

18. Lesme, R. O. (2010). *Factibilidad del empleo de los residuos de la industria de la madera para la obtencion de energia electrica*. Recuperado el 27 de Abril de 2010, de http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/ecosolar11/HTML/articulo05.htm

19. López, G. (2010). John Deere. *Review* , 12-14.

20. MacFarlane, D. (2009). Potential availability of urban wood biomass in Michigan: Implications for energy production, carbon sequestration and sustainable forest management in the U.S.A. *ELSEVIER: Biomass & Bioenergy* , 33: 628-634.

21. Martinez, S. (2010). *La Madera Aserrada en México.* Chihuahua Chih.: Libro en revisión, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agricolas y Pecuarias (INIFAP), C,E. La Campana México.

22. Maslatón Carlos, A. l. (14 de marzo de 2008). *Cifras para pensar: pellets de madera para usos energeticos IADE*. Recuperado el 20 de mayo de 2011, de http://www.iade.org.ar/modules/noticias/article.pl.

23. Moran, J. G. (2003). Experimental modelling of a pilot lignocellulosic pellets stove plant. *Biomass & Bioenergy* , 27: 577-583.

24. Rabier, F. T. (2006). Particle density determination of pellets and briquettes. *Biomass & Bioenergy* , 30: 954-963.

25. Reali, P. (2011). Situación actual del mercado de pellets energéticos en la unión Europea. *Forestalweb* , http://www.forestalweb.com/Pablo-Reali/situacion-actual-del-mercado-de-pellets-energeticos-en-la-union-europea/.

26. Reyna, J. V. (1998). Thermogravimetric study of pyrolysis of waste wood thermochimica. *ELSEVIER* , 320: 161-167.

27. Rodriguez, D. (octubre de 2006). *Pellets de madera: una alternativa para los residuos y subproductos forestoindustriales*. Recuperado el 30 de mayo de 2011, de http://www.inta.gov.ar/concordia/info/Forestales/contenido/pdf/2006/286.IV-Rodriguez%20-%20INDERFOR.pdf.

28. Samuelsson, R. T. (2009). Fuel processing technology. *ELSEVIER* , 90: 1129-1134.

29. solidos, I. R. (s.f.). *Instituto Politecnico Nacional, Secretaria Academica, Programa Ambiental del IPN.* Recuperado el 25 de febrero de 2011, de http://www.programambiental.ipn.mx:70/documentos/ambiental/tripticos/residuos_solidos.pdf.

30. Soto, G. N. (2008). Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrin de pinus radiata (D. Don), como material aglomerante. *Maderas ciencia y tecnologia* , 2.

31. Tarquin, A. y. (2006). Ingenieria Económica sexta edición. En A. y. Tarquin, *Ingenieria Económica sexta edición* (págs. 52-58). México, D.F.: McGraw-Hill.

32. Taylora, J. H. (2009). The influence of distance from landfill and population density on degree of wood residue recycling in Australia. *ELSEVIER Biomass & Bioenergy* , 33: 1474-1480.

33. Telmo, C., & Lousada, J. (2011). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass & Bioenergy* , 35:1663-1667.

34. Thermya. (2006). *legislación residuos de madera.* Recuperado el 01 de marzo de 2011, de http://www.thermya.com/es/index_thermya.php?id=28.

35. Thiers S., B. A. (2010). Experimental characterization, modeling and simulation of a wood pellet micro-combined heat and power unit used as a heat source for a residential building. *Energy and Buildings* , 42:896-903.

36. Totsolar-Termosun. (s.f.). *La biomasa, el combustible limpio, ecológico y económico.* Recuperado el 26 de febrero de 2011, de http://www.totsolar.com/biomasa%20web.PDF.

37. Totsolar-Termosun. (2011). *La biomasa, el combustible limpio, ecológico y económico.* Recuperado el 26 de febrero de 2011, de http://www.totsolar.com/biomasa%20web.PDF.

38. Uasuf, A. y. (2011). Wood pellets production cost and energy consumption under different framework in Northeast Argentina. *Biomass & Bioenergy* , 35:1357-1366.

39. Verma V.K., S. B. (2011). Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads: Part-2. *Biomass & Bioenergy* , 35:272-279.

40. Vinterbäck, J. (2004). Pellets 2002: The first world conference on pellets. *Biomass & Bioenergy* , 27: 513-520.

41. Wolf, A. V. (2005). Energy-efficient pelle production in the forest industry - a study of obstacles and success factors. *Biomass & Bioenergy* , 30: 38-45.

42. Yazdanpanah F., S. S. (2011). Airflow versus pressure drop for bulk wood pellets. *Biomass & Bioenergy* , 35:1960-1966.