POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.

"Desteñido de mezclilla con láser"

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGIA

PRESENTA:

Lic. ISAAC COMPEAN MARTINEZ

ASESOR:

DR. JUAN JOSÉ SOTO BERNAL

Aguascalientes, Ags. Septiembre de 2004

A mi Hermana
con cariño

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Centro de Investigaciones en Óptica A.C. por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios en sus instalaciones; agradezco a la Dra. Sofía E. Acosta Ortiz por su apoyo en el inicio de este proyecto y en especial al Dr. Juan José Soto Bernal, por su paciencia durante la supervisión del presente trabajo.

De igual forma agradezco al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) por todo el apoyo brindado en este tiempo.

Finalmente y aunque con igual importancia agradezco a mi familia, a mi hermosa y linda flor y a amigos que de una u otra forma me apoyaron en la realización del presente trabajo.

APORTACION CIENTIFICA:

- Removal of the indigo color by laser beam-denim interaction. Optics and Lasers in Engineering 34 (2000) 179-189.

- Removal of the indigo color by laser beam-denim interaction Proc. SPIE Vol. 4430, p. 290-296, ROMOPTO 2000: Sixth Conference on Optics.

- Desteñido de Mezclilla por Láser, en Revista Cubana de Fisica Vol. 18, No.1, 2001.

- A comparison between characteristics of various laser-based denim fading processes. Optics and Lasers in Engineering 39 (2003) 15-24.

- Desteñido de Mezclilla por láser, Quinta Convención Internacional de las industrial Metalúrgica, Mecánica y del Reciclaje, METANICA 2000, La habana Cuba, julio 2000.

- Desteñido de Mezclilla con láser, Séptimo Simposio de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Aguascalientes, Ags., Septiembre 2000.

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue encontrar una manera alternativa de realizar el desteñido de mezclilla utilizando la tecnología láser, ya que el proceso actual representa una importante fuente de contaminantes para el agua utilizada. Para poder determinar el tipo de láser que nos diera una mayor eficiencia y que lograra producir un desteñido, se estudio la interacción de diferentes tipos de láseres tales como: Nd:YAG (1064 nm y 532 nm) en modo pulsado y CO_2 (10.6μm) en modo continuo.

El trabajo se enfoco en la mezclilla de color índigo, ya que es la que tiene una mayor demanda en el mercado. Los experimentos realizados nos muestran que el láser puede remover eficientemente el color de la mezclilla. Para determinar la densidad de potencia y la fluencia necesarias para iniciar el proceso de desteñido se irradiaron muestran con diferentes parámetros del pulso láser. Se determinó el cambio en los espectros de reflectividad difusa después de la irradiación con las diferentes longitudes de onda y densidades de potencia.

Como resultado de pruebas aplicadas (solideces al color, pruebas físicas de durabilidad) a dos muestras, una muestra irradiada con láser y otra obtenida con el desteñido tradicional, se encontró en algunos casos que la tecnología con láser es mejor, además de la importante reducción en la contaminación del agua.

CONTENIDO

Dedicatoria **II**

Agradecimientos **III**

Aportación científica **IV**

Resumen **V**

Capítulo I **Introducción** **1**

Capítulo II **El Láser** **3**

2.1 Introducción 3

2.2 La radiación láser 3

2.3 Principales propiedades de los láseres 5

2.4 Amplificación de la luz 10

2.5 Absorción y emisión 13

2.6 Creación de la inversión de población 15

2.7 Tipos de láseres 17

2.8 Aplicaciones de los láseres 35

2.9 Seguridad en el trabajo con láseres 41

Capítulo III. **Desteñido y Contaminantes** **47**

3.1 Desteñido tradicional 47

3.2 Química del desteñido 50

3.3 El agua y sus contaminantes. 53

Capítulo IV. Desarrollo Experimental y Resultados **62**

4.1 Introducción 62

4.2 Experimentos 65

4.3 Resultados 67

Capítulo V. Estudio Económico **85**

Capítulo VI. Conclusiones **89**

Bibliografía **91**

Índice de figuras **93**

Índice de tablas **95**

CAPITULO I

INTRODUCCION:

El agua no sólo es parte esencial de nuestra propia naturaleza física y la de los demás seres vivos, sino que también contribuye al bienestar general de todas las actividades humanas. Una de estas actividades donde se utiliza el agua en grandes cantidades es en la producción de prendas de vestir con diferentes acabados, uno de ellos es la mezclilla desteñida.

Actualmente, el desteñido de mezclilla se logra utilizando lavadoras convencionales, grandes cantidades de agua, y varios productos químicos altamente contaminantes. Por ejemplo, el método "Stone wash" utiliza piedra pómez durante el proceso, las cuales impactan el material para producir el efecto deseado. Otro método para dar un terminado a la prenda es el uso de productos químicos tales como peróxidos y productos alcalinos para lograr un desteñido uniforme. Desarrollos mas recientes han incluido el uso de enzimas u otros agentes bacteriológicos en el proceso de desteñido.

Durante el proceso de desteñido por cualquier método o acabado, se utilizan grandes cantidades de agua, aproximadamente 30 litros por prenda. Si consideramos la demanda de este tipo de prendas, el gasto anual de agua dentro de la industria del desteñido llega a varios millones de litros de agua al año. Lo que es peor, el agua utilizada en este proceso es contaminada enormemente con tintes y otros productos químicos lo que re-

quiere que se le de un tratamiento especial (que no siempre se logra) si se requiere reutilizar.

El propósito de este trabajo fue encontrar un método alternativo de desteñido de mezclilla que disminuyera la contaminación de aguas residuales, pero que mantuviera la calidad de la prenda.

La luz láser es utilizada para grabar varios materiales, el calor disponible cuando la luz láser es enfocada en un pequeño punto puedes ser utilizada para cambiar las propiedades físicas y visibles del material.

Para poder obtener estos cambios en la mezclilla, se realizaron irradiaciones a diferentes muestras con láseres de Nd:YAG (1064 nm y su segundo armónico 532 nm) y CO_2 (10.6μm). Se utilizaron diferentes parámetros del pulso láser para obtener una la densidad de potencia y la fluencia necesarias para iniciar el proceso de desteñido.

Con el propósito de medir los cambios de reflectividad difusa, después del tratamiento con las diferentes longitudes de onda y densidades de potencia se llevaron acabo mediciones de reflectividad, y para demostrar la efectividad de esta tecnología se llevaron acabo pruebas físicas para determinar la calidad del producto.

CAPITULO II

EL LÁSER

2.1 Introducción

El láser forma parte de cualquier lista de las grandes invenciones de la última mitad del siglo XX. Junto con el satélite, la computadora y los circuitos integrados, es un símbolo de "alta tecnología". La tecnología láser real, puede no ser muy espectacular, pero sí es importante y fascinante. Los láseres pueden enviar señales a larga distancia por medio de fibra óptica, leer códigos impresos (códigos de barras), diagnosticar y a veces curar ciertas enfermedades, cortar y soldar materiales y realizar mediciones con alta precisión. Con los láseres se pueden grabar hologramas, proyectar patrones de luz, tocar música digital grabada en un disco compacto, etc.

2.2 La radiación láser

La palabra láser proviene del "acrónimo", Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación). La luz ordinaria, como la del sol o la de un foco se emite espontáneamente, cuando los átomos o moléculas se liberan del exceso de energía, sin ninguna intervención externa. La emisión estimulada es diferente, ya que ocurre cuando un átomo o una molécula mantiene un exceso de energía hasta que es estimulada para emitirla como luz.

En 1917 Albert Einstein fue el primero en sugerir la existencia de la emisión estimulada [1]. El primero en lograr la emisión estimulada fue Charles H. Townes, pero en lugar de trabajar con luz lo hizo con microondas y construyó un dispositivo al cual lo llamó "maser", por Microwave Amplifiction by Stimulated Emission of Radiation , pero no fue sino hasta 1957 cuando Charles H Townes y Arthur Shawlow escribieron un artículo donde se definían las condiciones necesarias para amplificar la emisión estimulada de ondas visibles. Al mismo tiempo, Gordon Gould escribió una serie de notas con ideas similares. Townes y Schalow publicaron sus ideas en una revista científica, Physical Review Letters, sin embargo Gould llenó la aplicación de la patente. Por décadas, la gente aún se pregunta quien merece el crédito por el concepto láser.

En mayo de 1960, Theodore Mainman [2] fue el primero en construir un láser, para lo cual utilizó una barra de rubí y dos espejos colocados uno a cada lado de la barra e iluminándola con una lámpara flash. Este emitía luz en un haz angosto y concentrado a una longitud de onda de 694 nm y en pulsos cortos e intensos.

Se puede pensar que los láseres emiten solo en luz visible, pero los principios básicos son válidos en casi todo el espectro electromagnético: ultravioleta, infrarrojo y rayos X. La figura 2.1 muestra el espectro electromagnético [3], la tabla 2.1 muestra las longitudes de onda y frecuencias que comprenden dicho espectro.

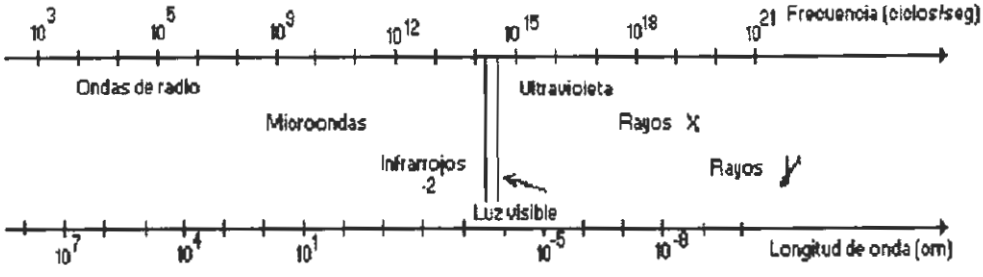


Figura 2.1. Espectro Electromagnético.

Tabla 2.1. Longitudes de onda y frecuencias del Espectro Electromagnético

Nombre	Longitud de Onda	Frecuencia
Rayos Gama	Debajo de $3x10^{-11}$	Arriba de 10^{20}
Rayos X	$3x10^{-11}$ a 10^{-8}	$3x10^{16}$ a 10^{20}
Ultravioleta	10^{-8} a $4x10^{-7}$	$7.5x10^{14}$ a $3x10^{16}$
Visible	$4x10^{-7}$ a $7x10^{-7}$	$4.2x10^{14}$ a $7.5x10^{14}$
Infrarrojo	$7x10^{-7}$ a 10^{-3}	$3x10^{11}$ a $4.2x10^{14}$
Microondas	10^{-3} a 0.3	10^{9} a $3x10^{11}$
Ondas de Radio	0.3 a 30000	10^{4} a 10^{9}
Ondas de baja frecuencia	Por arriba de 30000	Por debajo de 10000

2.3 Principales propiedades de los láseres

2.3.1 Longitud de onda

La longitud de onda es una característica fundamental de la luz visible y otras formas de radiación electromagnética. Nosotros percibimos el rango de longitudes de onda de la luz visible como color. Cada tipo de láser emite una longitud de onda característica o un rango de longitudes de onda, esto depende del tipo de material activo, del sistema óptico y de la forma en que el láser es bombeado. Sin embargo, los láseres pueden producir luz en el infrarrojo, el visible y ultravioleta. La tabla 2.2 muestra algunos tipos de láseres así como sus longitudes de onda. La mayoría de los láseres son monocromáticos, término que significa que emiten una sola longitud de onda. Algunos de estos láseres emiten luz a diferentes longitudes de onda bajo diferentes condiciones.

Algunos láseres pueden emitir dos o mas longitudes de onda al mismo tiempo; a esto se llama emisión multilínea [1]. En algunos casos las longitudes de onda se encuentran muy cerca una de otra, como en el caso del láser de argón, CO_2 y kriptón.

Tabla 2.2. Principales tipos de láseres y sus longitudes de Onda

Tipo	Longitud de onda (nm)
Kriptón – fluoride excimer	249
Xenón – fluoride excimer	308
Nitrógeno (gas N2)	337
Organic Dye (en solución)	300 – 1000 Sintonizable
Kriptón	335 – 800
Argón	450 – 530 (488 y 515 más intensas)
Helio – Neón	543, 632.8, 1150
Semiconductor (familia GaInP)	670 – 680
Rubí	694
Semiconductor (familia GaAlAs)	750 – 900
Neodimio YAG	1064 y con doblador KTP 532
Semiconductor (familia InGaAsP)	1300- 1600
Hidrógeno – fluoride químico	2600 – 3000
Bióxido de Carbono (CO_2)	9000 – 110000 (línea principal 10,600)

2.3.2 Potencia de salida

La potencia de salida mide la fuerza de un haz láser, la cual difiere ampliamente dependiendo del tipo de láser. Estrictamente hablando, la potencia es el flujo de energía del láser en la forma de un haz por unidad de tiempo, se mide en watts y esta definida por:

$$Potencia = d(energía) / d(tiempo) \tag{2.1}$$

La potencia de salida de los láseres cubre un amplio rango. Algunos láseres producen haces que tienen menos de una milésima de un watt (miliwatt), mientras que otros producen miles de watts (kilowatts) [4].

2.3.3 Duración de la emisión (pulsada o continua)

Por lo general se piensa que los láseres emiten un haz continuo de luz, como un foco. Así lo realizan algunos láseres, como los de He-Ne, sin embargo, otros emiten pulsos de luz. Estos pulsos pueden ser de diferente duración y frecuencia. El tiempo de duración de un pulso se encuentra en el rango de los milisegundos (10^{-3}) a los femtosegundos (10^{-15}). Dichos pulsos se pueden repetir una vez cada minuto o miles de veces en un segundo. Debido a que la respuesta del ojo es mucho más lenta que la de los láseres más de diez pulsos en un segundo parecen una emisión continua, no para los detectores electrónicos que pueden detectar estos pulsos tan cortos. Existen relaciones importantes y fundamentales entre longitud del pulso, energía, frecuencia de repetición y potencia. Una aproximación sería:

$$Energía\ por\ pulso = Potencia\ pico\ x\ tiempo\ de\ duración \tag{2.2}$$

Si se quiere hacer una relación exacta se tiene que tomar la integral:

$$Energia = \int Potencia \cdot d(tiempo) \tag{2.3}$$

esto debido a que la potencia varia durante el tiempo que dura el pulso.

La potencia promedio de un haz láser pulsado es una medida del flujo promedio de energía por segundo y es diferente de la potencia pico, por lo que se tiene:

$$Potencia\ promedio = \frac{Número\ de\ pulsos\ x\ energía\ por\ pulso}{Tiempo} \tag{2.4}$$

si el número de pulsos se mide como frecuencia de repetición y el tiempo se normaliza a un segundo entonces la potencia promedio queda como:

$$Potencia\ promedio = Frecuencia\ de\ repeticion \times Energía\ por\ pulso \tag{2.5}$$

La potencia pico y la potencia promedio pueden ser cantidades importantes, dependiendo de la aplicación. Ambas se miden en watts, y como es de esperarse, la potencia pico es mas grande. La energía por pulso se mide en joules. La conversión entre estas unidades es:

$$Watts = Joules/Segundo \tag{2.6}$$

La **densidad de potencia** se define como la potencia proporcionada por unidad de superficie de interacción. Para un espot láser circular la densidad de potencia esta dada por:

$$D_p(W/cm^2) = \frac{4P}{\pi w^2} \tag{2.7}$$

Donde P es la potencia del láser, y w es el diámetro del espot láser sobre la muestra. La densidad de potencia es la cantidad que determina cualitativamente la interacción entre el láser y el material. Se interpreta como la concentración de intensidad necesaria para obtener un cierto efecto.

La fluencia por pulso se define como la cantidad de energía proporcionada por el láser sobre la unidad de superficie en un pulso y esta dada por:

$$F(J/cm^2) = \frac{W}{S} \tag{2.8}$$

Donde W es la cantidad de energía, S la superficie que recibe la cantidad de energía W.

2.3.4 Tamaño y divergencia del haz

Si observamos un haz láser brillando a través de un medio con partículas pequeñas (de polvo o humo), parece una cuerda o una línea muy delgada. Sin embargo, si observamos cuidadosamente sobre su trayectoria se puede observar que tiene un cierto diámetro y conforme la distancia aumenta, esta diámetro aumenta, este diámetro se hace mas grande. Este efecto se llama Divergencia.

La divergencia del haz se mide en miliradianes. Un radián es igual a 57.3 grados; 2π radianes es igual a 360 grados, un círculo completo. Los radianes se utilizan debido a que el tamaño de un ángulo pequeño en radianes es casi igual al seno del mismo, haciendo simple el cálculo del tamaño de un haz láser. Una vez que se esta lo suficientemente lejos del láser, simplemente se multiplica el seno del ángulo de divergencia (el

cual es igual al valor del ángulo para ángulos pequeños medidos en radianes) por la distancia que el haz ha viajado para obtener el radio de la mancha, como se muestra en la figura 2.2, entonces:

$$Radio = Distancia\ x\ seno\ (divergencia\ del\ haz) \tag{2.9}$$

Si la divergencia es de 2 miliradianes, después de que el haz ha viajado 10 metros, su radio es de 20 mm, y su diámetro es de 40 mm. No todos los láseres tienen esta divergencia tan pequeña, pero los que sí, pueden viajar distancias muy grandes. Esta alta direccionalidad es una de las propiedades más importantes de los láseres [4].

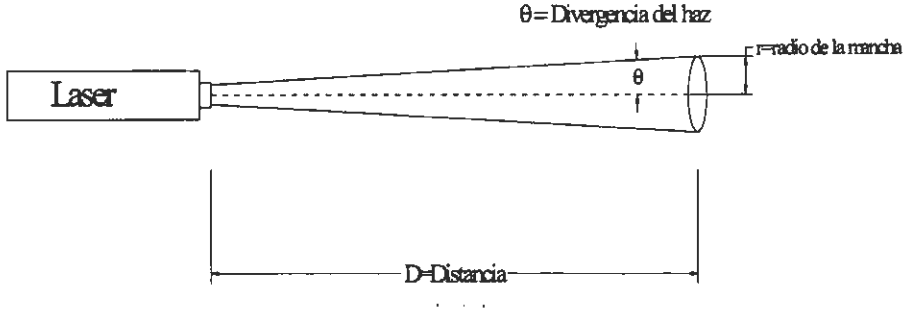


Figura 2.2. Cálculo de la mancha del tamaño del láser a partir de la divergencia.

2.3.5 Coherencia

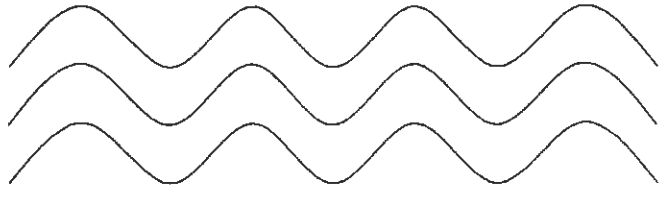


Figura 2.3. Radiación Coherente.

La radiación electromagnética es un fenómeno oscilatorio. Los campos eléctricos y magnéticos están oscilando de una manera senoidal acopladas ordenadamente entre si. Sin embargo estas oscilaciones no mantienen su acoplamiento por mucho tiempo y no siempre son las mismas en todos los puntos del espacio ocupado por la luz. El grado de relación que hay entre estas oscilaciones en diferentes momentos y en diferentes posi-

ciones define la coherencia de la radiación. La coherencia de la radiación es la que determina la visibilidad de los fenómenos de interferencia (superposición constructiva de ondas) que se utilizan en ciertos métodos de medición con láser. Los láseres tienen un grado muy alto de coherencia en comparación con otras fuentes de luz como consecuencia del mecanismo de generación. Muchas aplicaciones de los láseres no requieren de luz coherente; sin embargo, la coherencia es esencial en holografía y algunas aplicaciones de medición [4].

2.3.6 Eficiencia y requerimientos de potencia

Aparte de la longitud de onda, potencia de salida y características del pulso, existen otros dos factores importantes: eficiencia y requerimientos de potencia. Los láseres difieren mucho en que tan eficientes son para convertir la energía que se les suministra (generalmente en forma de electricidad) en energía luminosa. Como otras fuentes de luz, no son muy eficientes en la generación de luz, la mejor conversión de energía de entrada en luz es de alrededor del 20%. Existen varios tipos de láseres que convierten el 0.01% y hasta el 0.001% de la energía de entrada en energía luminosa.

La emisión láser depende de cómo los átomos y moléculas emiten luz, y esto depende de su estructura interna. De igual forma, los láseres son dispositivos ópticos y para utilizarlos se requiere de óptica, la cual incluye los espejos del mismo láser, lentes, prismas, hasta espejos para direccionar el haz. La excitación nunca alcanza el 100% de eficiencia.

2.4 Amplificación de la luz

Todos los láseres tienen una sustancia que puede incrementar la intensidad de luz que pasa a través de ella. Esta sustancia se llama medio activo. El medio activo, una vez que es bombeado, ya sea por medio eléctricos, ópticos o químicos, puede amplificar la luz que pasa a través de él. El medio activo puede ser un sólido, un líquido o un gas.

En un láser de YAG (Nd:YAG), el medio activo es una barra de Ytrio Aluminio Garnet (YAG) que contiene iones de neodimio. En un láser dye, es una solución de un colorante fluorescente en un solvente como el metanol. En un láser de He–Ne es una mezcla de helio y neón. En un diodo láser es una capa delgada de material semiconductor que se encuentra entre otras dos capas de semiconductor. El factor por el cual la intensidad de la luz se incrementa en el medio activo se conoce como ganancia. La ganancia no es constante para un tipo particular de medio, depende de la longitud de onda de la luz, la longitud del medio activo y de la extensión que el medio activo ha sido energizado o bombeado.

Un láser consiste de un medio activo bombeado posicionado entre dos espejos, como se indica en la figura 2.4.

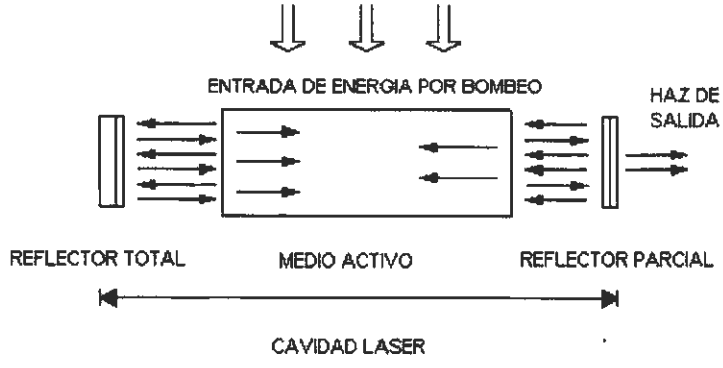


Figura 2.4. Disposición básica de un láser.

El espacio entre estos dos espejos se conoce como cavidad láser. El haz dentro de la cavidad pasa por múltiples reflexiones entre los espejos y es amplificado cada vez que pasa por el medio activo. Uno de los espejos refleja casi toda la luz que incide en él (reflector total). El otro espejo refleja entre el 20% y el 99% de la luz que incide, de-

pendiendo del tipo de láser, la luz que no se refleja es transmitida a través del espejo y la parte transmitida constituye lo que es el haz de salida del láser.

La cavidad láser tiene varias funciones importantes. Después del bombeo, la emisión espontánea de luz de los átomos excitados dentro del medio activo inicia la emisión de luz de baja intensidad en la cavidad láser. Esta luz se incrementa en intensidad cada vez que pasa a través del medio activo de tal forma que rápidamente se convierte en un haz intenso. En ausencia de los espejos, este proceso de auto inicio u oscilación no ocurriría.

La cavidad se puede diseñar para que la divergencia del haz sea pequeña. Solo la luz que viaja en una dirección casi paralela al eje de la cavidad puede pasar por las múltiples reflexiones en los espejos y pasar varias veces a través del medio activo. Los rayos más divergentes realizarán un camino de zig-zag en la cavidad y saldrán de esta.

La cavidad láser también mejora la pureza espectral del haz láser. Generalmente el medio activo amplificará la luz dentro de un rango angosto de longitudes de onda; sin embargo, dentro de este rango, solo la luz de ciertas longitudes de onda pueden pasar por repetidas reflexiones dentro de la cavidad.

Las características que un haz de luz debe tener dentro de la cavidad para poder pasar por repetidas reflexiones definen lo que es llamado como el modo de la cavidad. La luz que puede ser amplificada por el medio activo pero no pertenece a uno de estos modos especiales de oscilación se atenúa rápidamente, lo que ocasiona que no este presente en el haz de salida. Este comportamiento es similar al de una cuerda de guitarra vibrando, esa cuerda en particular solo vibrará a ciertas frecuencias. De esta forma similar, la cavidad óptica solo podrá soportar reflexiones repetidas para longitudes de onda muy bien definidas [3].

2.5 Absorción y emisión

Hasta ahora no se ha mencionado nada acerca de cómo un medio activo amplifica la luz. Debemos empezar en como la luz puede interactuar con "átomos" individuales en un medio activo ("átomos", se incluirán moléculas y iones). Los átomos consisten de un núcleo cargado positivamente, el cual está rodeado por electrones cargados negativamente. De acuerdo a la descripción de un átomo en mecánica cuántica, la energía de un átomo solo puede tener ciertos valores y estos están representados por niveles de energía. Se puede pensar en los electrones orbitando el núcleo, aquellos con más energía se encuentran orbitando a mayores distancias del núcleo. Hay muchos niveles de energía que un electrón dentro de un átomo puede ocupar, pero aquí solo consideraremos dos. También consideraremos solo los electrones en las órbitas más exteriores, ya que estos pueden ser elevados más fácilmente a estados de energía más altos, no completos.

2.5.1 Absorción y Emisión espontánea

El proceso de absorción y emisión espontánea de la luz se ilustra en la figura 2.5. Un fotón de luz es absorbido por un átomo en el cual uno de los electrones se encuentra inicialmente en un estado de energía bajo denotado por 0. La energía del electrón se eleva hasta el nivel de energía mas alto, 1, y permanece en este estado excitado por un periodo de tiempo que es típicamente menor que 10^{-6} seg, el cuál se conoce como estado metaestable.

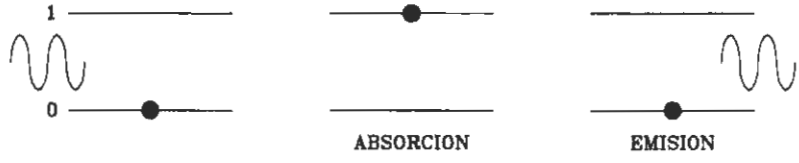


Figura 2.5. Proceso de absorción y emisión espontánea.

Entonces regresa espontáneamente al estado más bajo 0, con la emisión de un fotón. La absorción se refiere a un proceso resonante, ya que la energía del fotón absorbido debe ser igual a la diferencia de energía entre los niveles 0 y 1. Esto significa que solo los fotones de cierta frecuencia (long. de onda) serán absorbidos. Similarmente, el fotón emitido tendrá una energía igual a la diferencia de energía entre los dos niveles (0 y 1). Estos procesos comunes de absorción y emisión espontánea no pueden realizar la amplificación de la luz. Lo más que se puede lograr es que por cada fotón que se absorbe, otro es emitido [1].

2.5.2 Emisión estimulada

La emisión estimulada es un proceso no muy común en la naturaleza pero es esencial para el funcionamiento de los láseres. Esto se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6. Proceso de absorción y emisión estimulada.

Ya se comentó que un electrón en un estado alto de energía, o excitado, puede regresar a su estado más bajo espontáneamente. Sin embargo, si un fotón interactúa con el átomo en un estado excitado, pueden estimular el regreso de un electrón a su estado más bajo. Un fotón interactuando con un átomo excitado da como resultado la emisión de dos fotones. Aún más, estos dos fotones emitidos están en fase, i.e. pensando en ellos como ondas, la cresta de la onda asociada con un fotón ocurre al mismo tiempo que la onda asociada con el otro. Este es el proceso que da pie a la amplificación de la luz. Así como la absorción, éste es un proceso resonante, la energía del fotón debe ser igual a la diferencia de energía entre los dos niveles. Ahora, si consideramos un fotón interac-

tuando con un átomo, la emisión estimulada es justo como la absorción, cuyo proceso ocurre dependiendo de si el átomo esta inicialmente en el nivel de energía más alto o más bajo. Sin embargo, bajo la mayoría de las circunstancias, la emisión estimulada no ocurre a una extensión significante. La razón es que habrá mucho más átomos en el nivel de energía más bajo 0, que en el nivel mas alto 1, así que la absorción será mucho más común que la emisión estimulada. Si la emisión estimulada es predominante, debemos tener más átomos en el estado más alto de energía que en el más bajo. Este estado inusual se llama inversión de población y es una condición necesaria para que la acción láser ocurra [1].

2.6 Creación de la inversión de población

El encontrar sustancias en las cuales se puede realizar la inversión de población es la acción central para el desarrollo de nuevos láseres. El primer material utilizado fue el rubí sintético, el cual esta compuesto de Allumina cristalline (Al_2O_3) en el cual una pequeña fracción de iones de Al^{3+} se ha reemplazado por iones de cromio, Cr^{3+}. Son precisamente los iones de cromio los que le dan la característica de color rosa o rojo del rubí y es en estos iones donde se realiza la inversión de población. En la figura 2.7 se muestran los niveles de energía de los iones de cromio en el rubí.

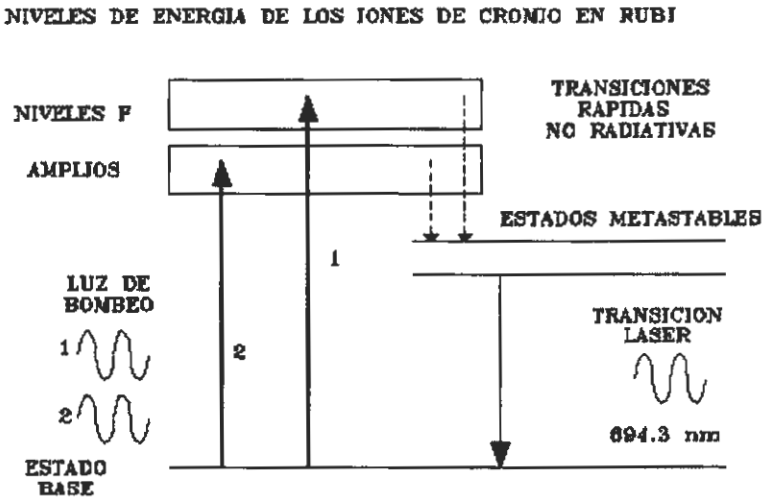


Figura 2.7. Niveles de energía de los iones de cromio en el rubí.

En un láser de rubí, la barra es irradiada con la luz intensa de una lámpara de xenón. La luz de las regiones verde y azul del espectro es absorbida por los iones de cromio, elevando la energía de los electrones de los iones de su nivel de estado base a una de la bandas de los niveles F. Los electrones en las bandas F realizan transiciones no radiativas a los dos estados metastables de los niveles E. Una transición no radiativa no resulta en la emisión de luz; la energía liberada en la transición se disipa como calor en el cristal de rubí. Los niveles metastables son inusuales, ya que tienen un tiempo de vida relativamente largo, alrededor de 4 milisegundos, siendo el mayor proceso de decaimiento una transición del nivel mas bajo al estado base.

Este tiempo de vida largo permite una alta proporción (mas de la mitad) de los iones de cromio en los niveles metastables de tal forma que se crea una inversión de población entre estos niveles y el nivel de estado base. Esta inversión de población es la condición requerida para que la emisión estimulada provoque la absorción y de pie a la amplificación de la luz. En un arreglo de iones de cromio en el cual se ha creado la in-

versión de población, algunos decaerán espontáneamente al nivel de estado base emitiendo en este proceso luz roja de longitud de onda 694 nm. Esta luz puede interactuar con otros iones de cromio que se encuentren en los niveles metastables, provocando que estos emitan luz de la misma longitud de onda por emisión estimulada. Como cada fotón estimulado lleva a la emisión de dos fotones, la intensidad de la luz se incrementará rápidamente. De cualquier forma, es necesario crear una inversión de población para que la emisión estimulada ocurra mas seguido que la absorción [3].

2.7 Tipos de láseres

Los láseres se encuentran clasificados en tres grupos principales: gas, estado sólido y semiconductores. Existen algunas excepciones, el láser dye sintonizable, el de electrones libres y el de rayos X. a continuación se dará una breve explicación de cada uno de estos tipos de láseres, así como algunas de sus características principales [1].

2.7.1 Láseres de Gas o moleculares

Sus elementos básicos son: un tubo, el cual se puede llenar con la mezcla del gas deseado, un par de espejos y una fuente de excitación. La excitación puede ser: descarga eléctrica, radio frecuencia, microondas, química, expansión dinámica y óptica. La excitación produce vibraciones moleculares que son las encargadas de emitir la radiación láser. En la figura 2.8 se muestra la configuración básica de un láser de gas.

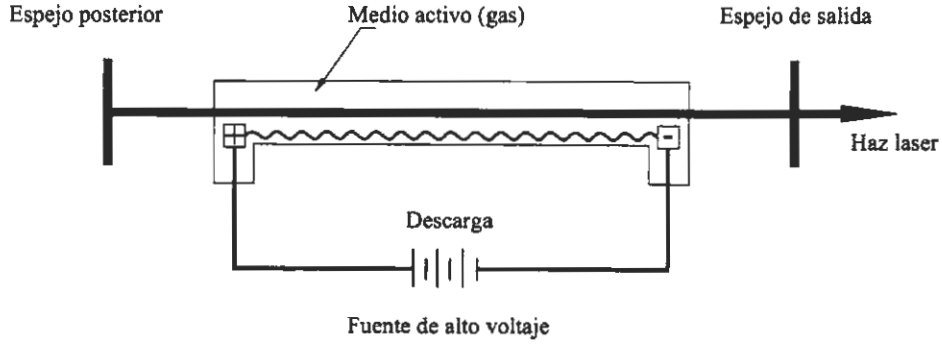


Figura 2.8. Elementos básicos de un láser de gas.

Láseres de He-Ne

Probablemente, el láser de He-Ne es el más común de los láseres de gas, ya que se utiliza en demostraciones, laboratorios, alineación, etc. En su forma más común, el láser de He-Ne emite desde una fracción de miliwatts, hasta decenas de miliwatts de luz roja a 632.8 nanómetros.

Entre las longitudes de onda de emisión producidas con este láser se encuentran: verde, amarillo, naranja e infrarrojo; sin embargo, la potencia de salida es más baja que en el rojo.

El medio activo, como su nombre lo indica, es una mezcla de Helio y Neón a presiones desde fracciones de torr hasta varios torr, la presión depende del diámetro del tubo. Típicamente, la mezcla de gas contiene de 5 a 12 veces más helio que neón.

Tabla 2.3. Principales longitudes de onda del He-Ne y niveles de potencia

Longitud de onda en nm	Máxima potencia en mW
543.5	1.5
594.1	7.0
632.8	75
1152.6	17.5
3392	24

En este tipo de láser, el espejo de salida transmite cerca del 1% de la luz, lo que se convierte en el haz láser. Las longitudes de las cavidades van desde 10 cm para modelos de baja potencia hasta varios metros para láseres con potencias en el rango de 50 mW. En la tabla 3 se muestran las principales longitudes de onda de emisión así como la potencia máxima.

La eficiencia de un láser de He-Ne es baja, típicamente en el rango de 0.01 a 0.1 por ciento. Normalmente, estos láseres producen haces continuos y por lo general no operan en el régimen pulsado.

La mayoría de estos láseres producen un haz en el modo transversal 0,0 (TEM_{00}) de buena calidad con la clásica distribución de intensidad Gaussiana; el diámetro del haz se encuentra alrededor de 1 milímetro y este se incrementa con el incremento de la potencia. La divergencia se encuentra en el orden de 1 miliradian.

Para su operación, estos láseres requieren de 115 Volts (V), aunque hay versiones para 220 V. El consumo de potencia se encuentra alrededor de los 20 W para un láser de 1 mW hasta 400 W para uno de 50 mW. La cabeza láser requiere pocos miliampers de corriente directa a un voltaje de 1000 a 2000 V. Requiriendo una balastra del rango de 45 a 100 $k\Omega$.

El enfriamiento de este tipo de láseres se basa en aire, ya que estos no generan gran cantidad de pérdida de calor, los de potencia más alta utilizan ventiladores y los de baja potencia hasta el aire del medio ambiente. Su tiempo de vida se encuentra entre 10000 y 20000 hrs [1].

Láseres de CO_2

El láser de CO_2 es uno de los más versátiles. Emite radiación en el infrarrojo entre 9 y 11 micras (μm). Puede producir potencias de salida continua que van desde 1 watt (W) hasta decenas de kilowatts para procesamiento de materiales. Pueden generar pulsos en el régimen de nanosegundos hasta milisegundos.

El medio activo es una mezcla de bióxido de carbono, nitrógeno y helio (generalmente). El bióxido de carbono es el emisor de luz. Las moléculas de nitrógeno ayudan

a excitar el CO_2 a el nivel láser más alto, el helio ayuda a que las moléculas de CO_2 caigan del estado más bajo al estado base.

La clasificación de estos láseres se basa en su estructura interna por lo que se tienen que tomar en cuenta varios parámetros, los cuales incluyen: presión del gas, flujo del gas, tipo de cavidad y método de excitación. Entre estos se encuentran: tubo sellado excitado por descarga, de onda guiada excitado por radio frecuencia, de flujo de gas longitudinal y de flujo de gas axial. Los láseres de flujo axial lento y rápido difieren en la velocidad del gas a través del tubo; en el último el láser funciona más eficientemente y puede generar más potencia.

Los materiales de transmisión que se utilizan para la salida a 10 μm difieren del vidrio óptico ordinario. Los dos más comunes son arsenuro de galio y germanio, los cuales no son transparentes al visible. Otros materiales que se utilizan son selenuro de zinc y cloruro de sodio. A altas potencias, la óptica resulta un problema, donde la baja absorción y la alta capacidad térmica son críticas. Los espejos de cobre tienen una mejor conductividad térmica, pero es un material más blando, difícil de pulir y costoso.

La longitud de onda de operación generalmente se representa como 10 μm, 10.6 μm o 9 a 11 μm, aunque las dos primeras transiciones se encuentran en 9.6 y 10.6 μm.

La eficiencia se encuentra entre el 5 y 20%, no muy buena comparada con otros tipos de equipo eléctrico, pero más alta que la mayoría de los láseres. El diseño de la cavidad láser y la óptica del resonador determinan los modos en los cuales un láser puede oscilar y estos modos juegan un papel importante en la determinación de la calidad del haz. Hay cuatro modos transversales de emisión básicos:

Emisión multimodo, en la cual la cavidad láser soporta simultáneamente diferentes modos de oscilación. Esto permite obtener la máxima potencia láser, pero el haz tiende a crecer en diámetro y diverge muy rápidamente lo que provoca una baja en la calidad.

Emisión TEM_{00}, en la cual la cavidad láser permite oscilaciones solo en el modo fundamental (TEM_{00}), produciendo un patrón de intensidad con un pico en el centro y una disminución de intensidad en las orillas, eso limita la cantidad de energía que puede ser extraída de la cavidad, sin embargo, el haz resultante es de mejor calidad que en la emisión multimodo. La potencia emitida se encuentra entre un cuarto y la mitad de potencia emitida en emisión multimodo.

Emisión resonador inestable, en la cual la óptica de la cavidad produce un haz en forma de dona. La potencia de salida se encuentra entre la mitad y dos terceras partes de la potencia emitida en multimodo.

Láseres de onda guiada, tiene una estructura de modo determinada por la naturaleza de la guía de onda más que por los espejos del resonador.

El diámetro del haz y la divergencia varían dependiendo de la forma, longitud de la cavidad láser y la naturaleza de la óptica utilizada. Por tanto estas cantidades difieren con el tipo de láser. La tabla 2.4 presenta el diámetro y la divergencia del haz de varios tipos de arreglos.

Tabla 2.4. Diámetro y divergencia del haz de los diferentes tipos de láseres de CO_2

Tipo de láser	Diámetro de haz (mm)	Divergencia(mrad)
Convencional sellado	1 a 7	2 a 6
Onda guiada	1 a 2	3 a 10
De flujo lento axial	3 a 15	1 a 4
De flujo rápido axial	8 a 25	1.5 a 5
Flujo transversal	13 a 50	1 a 3
TEA	4 a 200	0.5 a 10

Requerimientos de operación

La potencia de entrada, así como la potencia de salida se encuentran en unos cuantos órdenes de magnitud. El láser de CO_2 más pequeño se puede conectar en cualquier enchufe; el más grande consume grandes cantidades de potencia, los láseres de descarga controlados por dc requieren voltajes más altos, pulsados o continuos, que los láseres excitados por radio frecuencia.

Los láseres de onda guiada controlados por una descarga de dc generalmente consumen de 1 a 3 A de una fuente de 110 V de ac. Esta energía produce una corriente de unos cuantos miliampers a 15 kV para una descarga a lo largo de la longitud de la guía de onda.

Los láseres sellados controlados por descarga requieren de una potencia de entrada más alta para producir una salida comparable al tipo anterior, de 3 a 15 A de una fuente de 110 V de ac para una descarga a través del gas de 10 kV a unos cuantos miliampers.

Los láseres controlados por RF generalmente requieren cerca del doble de potencia que los de excitación por descarga. La mayoría operan a frecuencia entre 27 y 40 Mhz.

Los láseres de onda continua con flujo de gas requieren de entre 10 y 20 veces su salida óptica, así como una potencia de inicio extra.

Los precios de estos láseres varían dependiendo de su operación así como de la potencia de salida. La tabla 2.5 muestra algunos precios representativos [1].

Tabla 2.5. Precios representativos de los láseres de CO_2

Onda guiada	\$4500 - \$18000
Tubo sellado	\$2000 - \$40000
TEA	\$4500 - \$150000
Flujo lento axial	\$10000 - \$50000
Flujo rápido axial	\$60000 - \$300000
Flujo transversal	\$100000 - \$1000000

Láseres de gas noble: Argón y Kriptón

En este tipo de láseres el medio activo es un gas raro ionizado. Los de Argón, con sus líneas más fuertes en el azul – verde y más débiles en el ultravioleta e infrarrojo cercano. Los de Kriptón son los que ofrecen más rango de longitudes de onda, sin embargo son más débiles en cuanto a potencia.

Las longitudes de la cavidad pueden ser tan corta como 25 cm y hasta 2.5 m de largo. Los láseres comerciales multilínea varían de unos cuantos mW hasta 50 W. Estos láseres no son eficientes, para multilínea su eficiencia se encuentra entre 0.001 y 0.02, siendo menor en operación a una línea de emisión.

Los valores típicos del diámetro del haz y divergencia son de 0.6 a 2 mm y 0.4 a 1.2 mrad, respectivamente. Estos valores son un poco más grandes para los láseres de Kriptón que emiten en el rojo que para los láseres de Argón que emiten en el verde – azul.

Requerimiento de operación

Los requerimientos eléctricos de entrada van desde 10 a 15 A para una fase a 120 V hasta 60 o 70 A para tres fases. Estos requerimientos se incrementan al incrementar la potencia de salida. Un láser de argón con salida multilínea de 3 a 5 W requerirá de una entrada eléctrica de 8 a 2 kW.

Estos láseres requieren de enfriamiento ya sea por aire o por agua. De igual forma requieren de un tiempo de estabilización que varía desde 30 min. hasta 2 hrs. Una consideración especial es su alta sensibilidad a los cambios bruscos de temperatura y estrés mecánico.

Su tiempo de vida estándar va desde 1000 a 7000 hrs. para sistemas enfriados con agua y de 3000 a 10000 hrs. para los sistemas enfriados con aire. Estos tiempos de vida son más cortos para el caso de los láseres de Kriptón. Los precios de estos láseres han bajado en los últimos años, sin embargo el incremento en potencia incluye un incremento en precio. La tabla 2.6 muestra algunos precios representativos [1].

Tabla 2.6. Precios representativos para láseres de Argón

5 Mw, multilínea azul – verde	$3000
5 Mw, 488 nm	$4400
10 mW, 488 nm	$5000 - $6000
40 mW, multilínea azul – verde	$7000
50 mW, multilínea azul – verde	$5500
5 W, multilínea azul – verde	$12300 - $30000
25 W, multilínea azul – verde	$50000 - $80000
7 W, ultravioleta	$100000

Láseres de vapores de metal

Uno de los principales láseres descubiertos de este tipo fue el láser de He – Cd, puede producir potencias por arriba de los 150 mW a 442 nm en el azul o potencias cercanas a 50 mW en la línea 325 nm en el ultravioleta. Estos láseres tienen como medio activo vapor de cadmio ionizado.

Características del haz

La mayoría de los láseres de He – Cd, emiten a 442 nm en el azul o 325 nm en el ultravioleta. La óptica de la cavidad, la cual puede estar sellada permanentemente o externamente montada, selecciona la longitud de onda de trabajo.

La eficiencia de este tipo de láser para emisión en el azul varía desde 0.02 a alrededor de 0.002% la cual es más alta que en Argón, pero por debajo de He – Ne. Para el UV la eficiencia baja a la mitad del azul.

La mayoría de estos láseres emiten en continuo. El diámetro del haz en TEM_{00} a 442 nm es de 0.2 a 1.2 mm. La divergencia a 442 nm es de 0.5 a 3 mrad. La divergencia en la línea 325 nm es similar, 0.4 a 3 mrad, con diámetro del haz de 0.135 a 1.2 mm.

Requerimientos de operación

Durante su operación normal, un láser de He – Cd emitiendo unos cuantos miliwatts en el azul, consume alrededor de 165 W de potencia eléctrica, mientras que uno emitiendo 50 mW requerirá entre 350 a 560 W. Potencias de entrada similares producen casi la mitad de luz en la línea del UV 325 nm.

El sistema de enfriamiento más utilizado para este tipo de láser es con aire, ya sea por convección o por presión.

Los precios de estos láseres llegan hasta $15000 para potencias cerca de 25 mW en UV o 40 mW en el azul [1].

Láseres Excimer

El término láser excimer no describe a un solo dispositivo, sino a una familia de láseres con características similares de salida. Todos emiten pulsos de alta potencia que pueden durar nanosegundos o decenas de nanosegundos a longitudes de onda en el ultravioleta o cercanas. La mayoría de estos láseres operan con diferentes mezclas de gases para producir diferentes longitudes de onda de salida [5].

Este tipo de láser utiliza como medio activo una mezcla de gases. La mayoría de la mezcla, 90 o 99% es un solo gas, el cual media la transferencia de energía, por lo general se utiliza He o Ne. Las mezclas mas utilizadas en los modelos comerciales son: ArF, KrCl, KrF, XeCl y XeF.

La eficiencia de estos láseres se encuentra entre 1.5 y 5%. El tamaño del haz se encuentra entre 10 y 20 mm. La divergencia típica para estos láseres 1x3 o 2x3 mrad.

Los requerimientos de operación para estos sistemas van desde los 10 A y 110 V, monofásico, hasta 100 A y 208 0 380 V, trifásico.

El sistema de enfriamiento más común es el flujo de agua, entre 2 y 10 litros por minuto, llegando hasta 10 l/min. en láseres con potencias altas.

Los costos van desde $40000 a $100000 para algunos modelos estándar, llegando hasta cientos de miles de dólares para sistemas industriales de alta potencia [1].

2.7.2 Láseres de Estado Sólido

Láseres de Neodimio (Nd)

El láser de Neodimio es el más común de la familia de los láseres agrupados como Láseres de Estado Sólido. Estrictamente hablando, el medio activo en un láser de Nd es el neodimio ionizado en una matriz de cristal o vidrio. En un cristal, el Nd es una impureza que toma el lugar de otro elemento casi del mismo tamaño del ion (ytrium). La estructura de los niveles de energía, longitud de onda y otras propiedades ópticas de los iones de Nd están influenciadas por el material huésped. El huésped más común para el Nd es el Ytrium Aluminum Garnet (YAG), es un cristal sintético cuya formula es $Y_3A_{15}O_{12}$.

A pesar de que no es un material láser ideal es el mejor por sus características ópticas, mecánicas y térmicas, las cuales permiten que un láser Nd:YAG produzca un haz continuo de muy buena calidad. Se han probado muchos cristales huésped pero solo algunos se han encontrado útiles, en la tabla 2.7 se muestran los materiales más comúnmente utilizados así como sus longitudes de onda.

Tabla 2.7. Características principales de los huéspedes más utilizados para el Nd

Material	Longitud de onda nm
YLF	1047
Fosfato	1054
Vidrio GSGG	1061
Vidrio Silicato	1061 – 1062
YAG	1064

Hasta mediados de los 80´s, todos los láseres comerciales de Nd eran bombardeados por fuentes de luz de espectro amplio, lámparas de arco de tungsteno o lámparas flash pulsadas. Estas fuentes ofrecen una alta intensidad, pero mucha de su emisión no

es absorbida por los iones de Nd. En los últimos años se ha logrado excitar la banda de bombeo 0.8 mm con láseres de semiconductores GaAlAs, sin embargo la potencia de salida aún no se acerca a los niveles de bombeo con lámpara.

Para el bombeo con lámpara se utilizan cavidades reflectoras para transferir la luz de bombeo de una o más lámparas a la barra láser.

Características del haz

La longitud de onda de los láseres de Nd está especificada normalmente como 1.06 μm, la generación de armónicos puede multiplicar la frecuencia por un factor de 2, 3 o 4, lo que divide la longitud de onda por la misma cantidad, desplazando la emisión al visible o ultravioleta (532, 335 y 266 nm).

Con estos láseres se puede obtener un amplio rango de potencias de salida que depende de la configuración, fuente de bombeo y la longitud de onda.

Eficiencia

Los láseres bombeados con lámpara tienen una eficiencia típica de 0.1 a 1%. Los láseres bombeados con diodo pueden ser más eficientes, ya que el neodimio absorbe a 0.8 μm esta eficiencia puede llegar hasta 20%.

Divergencia y diámetro del haz

La divergencia del haz para láseres bombeados con lámpara va desde una fracción de un miliradian (mrad) hasta cerca de 10 mrad. El tamaño del haz generalmente es de 1 a 10 mm. Para láseres bombeados con diodo la divergencia típica varía de 1 a 10 mrad a 1.064 μm y tan pequeña como 0.6 mrad a 532 nm. El diámetro del haz va de 0.2 a 2 mm.

Requerimientos de potencia

Los láseres pequeños se pueden conectar en línea directa de 115 V ac los cuales pueden dar hasta 500 W. los modelos industriales que generan hasta decenas de kilowatts requieren de líneas de 3 fases (220 V o 440 V). Los bombeados con diodo requieren menos potencia eléctrica para bombear lo que una lámpara; sin embargo, muchos modelos requieren potencia eléctrica extra para el sistema de enfriamiento, el cual puede ser por aire o agua. En el caso de enfriamiento por agua los requerimientos de flujo van desde los 3 litros hasta los 60 litros por minuto. Algunos utilizan ciclos cerrados con intercambiador de calor.

Tiempo de vida

El sistema completo puede durar una década o más, sin embargo, existen algunos componentes que tienen que ser remplazados durante este periodo. Entre estos se encuentran las lámparas de bombeo, las cuales tienen un tiempo de vida que se mide en horas para emisión continua y en número de disparos para emisión pulsada [1].

2.7.3 Láseres de Semiconductor

Los primeros láseres de semiconductor se desarrollaron en 1962; sin embargo, fue hasta varios años después cuando se produjo el primer láser de semiconductor capaz de generar un haz continuo a temperatura ambiente. Estos han encontrado muchas aplicaciones las que incluyen comunicaciones por fibra óptica, reproductores y grabadores de discos compactos, impresoras láser y bombeo de láseres de estado sólido.

Como su nombre lo indica, estos láseres están hechos de semiconductores y tienen las mismas características eléctricas de los diodos. Al pasar una corriente eléctrica a través del diodo provoca que los portadores de corriente se recombinen en la unión entre las regiones con diferentes concentraciones de contaminantes. Este proceso de recombinación libera energía en forma de luz en algunos semiconductores, como el arsenuro de galio o semiconductores más complejos los cuales están compuestos de tres o cuatro

elementos. El proceso de recombinación genera emisión espontánea en la unión y para mantener la inversión de población se necesitan niveles de corriente altos.

Un diodo láser también requiere de una cavidad resonante y una estructura interna capaz de soportar las altas corrientes de control. Solo ciertos compuestos de semiconductor tales como GaAlAs y InGaAsP son adecuados para diodos láser.

El semiconductor es contaminado con impurezas para controlar el tipo y la densidad de portadores de corriente. El material contaminado con elementos que producen "hoyos" (o equivalentemente, aceptan electrones) se llama semiconductor tipo-p. El material contaminado con "donadores" de exceso de electrones se llama tipo-n.

Un diodo semiconductor es un dispositivo de dos terminales con una unión entre los materiales p y n. La aplicación de un voltaje negativo al material n y un voltaje positivo al material p crea un exceso local de portadores minoritarios en cada lado de la unión. Esto disminuye la barrera interna de potencial y causa una inyección de portadores de un lado a otro de la unión. En la unión, el exceso de electrones cae a estados de energía más bajos, i.e. hoyos en la banda de valencia

Características del haz

La longitud de onda de un diodo láser esta determinada por su estructura y el "bandgap" de su capa activa, esta cambia con la temperatura y la corriente de control, de tal manera que se pueden sintonizar sobre un rango limitado controlando las condiciones de operación (corriente y temperatura).

La eficiencia de estos láseres varía dependiendo del compuesto y la potencia, sin embargo se han encontrado eficiencias desde 10 hasta 60 %.

Calidad del haz

Con una cavidad que es muy corta y un área de emisión que es mas ancha que alta, un diodo láser produce un haz que diverge rápidamente. Para corregir esto se utilizan lentes cilíndricas y óptica para colimar y enfocar el haz.

El tiempo de vida de estos láseres es relativamente largo, este va desde 5000 hrs. hasta millones de hrs. que depende del compuesto, de la longitud de onda y de la temperatura de operación [1].

2.7.4 Láseres Líquidos

Si es posible que la acción del láser tenga lugar en los gases y en los sólidos ¿Por qué no en los líquidos? Los líquidos pueden constituir, efectivamente, el medio activo en los láseres, y existe un importante y extenso grupo de láseres basados en colorantes orgánicos. Los colorantes, que en realidad son sólidos a temperatura ambiente, son disueltos en líquido (por lo general de tipo orgánico, como el alcohol) para formar una disolución [1].

2.7.5 Láseres Dye

Este tipo de láser se puede sintonizar a una cierta longitud de onda desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo cercano, de igual forma pueden ser ajustados para operar en un ancho de banda espectral muy angosto, lo que produce luz de muy alta pureza. También pueden producir pulsos ultracortos con duraciones menores a picosegundos.

El medio activo en este tipo de láser es un compuesto orgánico fluorescente (Dye) disuelto en un solvente líquido. La fuente de bombeo, otro láser o una lámpara flash, excita las moléculas dye, produciendo la inversión de población. Un factor importante en el uso de estos láseres es la degradación que sufre el dye, esto debido a la luz de

bombeo y al calentamiento de la solución, o a una combinación de efectos fotoquímicos y térmicos.

Características del haz

La longitud de onda y la potencia de salida dependen del dye y la fuente de bombeo, así como del diseño del láser. El rango de frecuencia fundamental de salida va desde 310 a cerca de 1200 nm. La tabla 2.8 muestra una lista de los tipos de dyes y sus salidas para diferentes fuentes de bombeo

Tabla 2.8. Características de algunos láseres Dye para diferentes fuentes de bombeo

Dye	Longitud de onda en nm		Fuente bombeo	Bombeo,W	Salida en W (pico)
	Rango	Pico			
Polyphenil 2		383	Argón UV corto	3.4	0.25
Stilbene 1		415	Argón UV	6.0	0.42
(Stilbene 420)	414-465	435	Argón UV	7.0	1.0
Coumarin 102		477	Kr, 407-415 nm	4.8	0.58
Coumarin 30		518	Kr, 407-415 nm	4.6	0.38
Rhodamine 110	529-585	540	Ar, 455-514 nm	23	3.6
Rhodamine 590	573-640	593	Ar, 455-514 nm	24	5.6
Dicyanometil	610-709	661	Ar, 455-514 nm	20	2.9
Ti-zafiro		790	Ar, 455-514 nm	20	3.6
Dye IR 140	875-1015	960	Kr, 753-799 nm	3.0	0.2

Estos láseres pueden producir un haz de salida en forma continua o pulsada, dependiendo de la fuente de bombeo. Tanto la fuente de bombeo, como la cavidad influyen en la calidad del haz. Los de emisión continua emiten un haz linealmente polarizado TEM_{00}, mientras que los bombeados con lámparas flash generan un haz multimodo.

A continuación se muestran algunos valores típicos de diámetro y divergencia del haz para diferentes tipos de estos láseres.

Bombeados con láser CW: Divergencia de 0.5 a 2 mrad, diámetro del haz de 0.5 a 1mm.

Bombeados con láser pulsado: Divergencia de 0.5 a 10 mrad, diámetro del haz de 0.5 a 5mm, (la mayoría de 1 a 3mm).

Bombeados con lámpara flash: Divergencia de 0.5 a 3 mrad, diámetro del haz de 5 a 20 mm, aunque para versiones de alta potencia puede llegar hasta 50mm.

Requerimientos de operación

Los láseres Dye bombeados con láser requieren poca potencia eléctrica, ya que la luz externa es la que genera el haz; sin embargo, se necesita potencia para el control óptico y electrónico, bombeo de soluciones, etc. Todos los láseres de bombeo necesitan potencia eléctrica la cual se ha descrito anteriormente para cada tipo de láser.

Los láseres Dye bombeados con lámpara generalmente eliminan el exceso de calor mediante un flujo de agua a través del sistema (20 l/min), donde el agua enfría tanto la lámpara como la solución dye.

El único consumible en este tipo láseres es la misma solución dye. Esta sufre de degradación térmica y fotoquímica. Su promedio de vida útil va desde 1 hora hasta más de 1000 hrs. y varía considerablemente dependiendo del dye y las condiciones de operación, bajo condiciones favorables, algunos dyes pueden durar poco más de un año.

2.7.6 Láseres de laboratorio

Existen pocos láseres que no entran dentro de las categorías descritas anteriormente, dos de los más importantes son el láser de electrones libres y el láser de rayos X.

El medio activo en láser de electrones libres es un haz de electrones de alta energía, que pasa a través de de un campo magnético espacialmente periódico. Conforme los electrones se mueven en este campo, estos liberan energía y producen emisión estimulada, los detalles son complejos y no hay hasta el momento aplicaciones tangibles en el área de la industria.

En los láseres de rayos x, el medio activo es un plasma altamente ionizado el cual tiene una corta existencia. El plasma se produce depositando suficiente energía en un sólido para ionizarlo y vaporizarlo. Emite rayos x, los amplifica por emisión estimulada y rápidamente se disipa [1].

2.7.7 Láseres químicos

Los láseres de gas también pueden ser excitados, por así decirlo, con la sola ayuda de reacciones químicas. Lo más importante de dichas reacciones tiene lugar en el láser de fluoruro de hidrógeno, en el que se combina un átomo de hidrógeno con uno de flúor, produciendo fluoruro de hidrógeno. Al combinarse, ambos átomos se genera energía, y el producto inicial consiste en una molécula de fluoruro de hidrógeno en estado vibracional excitado. Normalmente, la energía en cuestión se disiparía en forma de calor, pero si se colocan las moléculas excitadas en una cavidad láser y se llevan a cabo todos los ajustes necesarios, se logra extraer dicha energía en la forma de un haz láser.

En la práctica, el hidrógeno y el flúor son introducidos en el láser, donde se encienden con el fin de que produzcan una llama, la cual a su vez provoca la formación de fluoruro de hidrógeno en estado excitado. A continuación, el gas que contiene fluoruro de hidrógeno excitado atraviesa una cavidad láser que presenta una superficie reflectante

en cada extremo. En dicha cavidad se obtiene un haz láser con una longitud de onda de unos tres micrómetros (3×10^{-3} mm) que se encuentra en la gama infrarroja. Gracias al paso ininterrumpido del fluoruro de hidrógeno a través de la cavidad, la acción del láser es continua. También resulta posible construir láseres de fluoruro de hidrógeno que emitan pulsaciones. Sin embargo, el diseño de grandes láseres químicos presenta un problema aerodinámico para lograr que el gas fluya adecuadamente y dichos láseres suelen tener el aspecto de túneles de ventilación.

Lo atractivo del láser de fluoruro de hidrógeno consiste en su capacidad para emitir a alta potencia. Los investigadores militares trabajan asimismo en el diseño de láseres de fluoruro de hidrógeno en los que se sustituye el hidrógeno por deuterio

2.8 Aplicaciones de los láseres

Las propiedades de la radiación láser, como la direccionalidad, la coherencia y el brillo, han hecho de esta una moderna herramienta para lograr una multitud de propósitos prácticos con mayor eficiencia y precisión que con los métodos clásicos y también han permitido realizar nuevos procesos que antes ni siquiera se habían contemplado. Los principios fundamentales sobre el manejo y el comportamiento de la radiación láser han sido rápidamente asimilados por los ingenieros, lo que ha permitido desarrollado una gran variedad de dispositivos, instrumentos e instalaciones que funcionan a base de láser, sean de baja o alta potencia, infrarrojos visibles, o ultravioleta, en onda continua o pulsados.

La mayoría de los sistemas láser que se encuentran en la industria son dedicados al procesamiento de los materiales y en una menor fracción a dispositivos de medición y detección. Los dispositivos láser de medición utilizan generalmente láseres de baja potencia y muchas veces el usuario ignora el hecho de que el funcionamiento de su equipo es a base de láser, puesto que esto puede ser completamente cerrado sin peligro alguno.

Del otro lado, el procesamiento de materiales es el lado fuerte de las aplicaciones, y como consecuencia, todas las instalaciones o dispositivos láser utilizan láseres de alta potencia (adecuada al proceso) lo que implica la necesidad de un buen conocimiento del funcionamiento del equipo, de las normas de seguridad y el mantenimiento específico que se les tiene que dar a estos.

Sin embargo, aprovechando las ventajas ofrecidas por el haz de láser (la falta de contacto mecánico) la mayoría de los sistemas modernos son automatizados. Prácticamente no hay instalación láser en la cual el operario tenga tanto acceso y libertad como en un torno o una fresadora, por ejemplo, para trabajar de la misma manera con un láser. Maquinas de control numérico combinadas con visión robótica les confiere a estos sistemas una mayor flexibilidad y adaptabilidad a nuevos procesos, precisión, repetibilidad, fiabilidad y confiabilidad [5]. El papel del factor humano se reduce a la programación y monitoreo del proceso y mantenimiento del equipo.

Entre las aplicaciones "fuertes" de los láseres en la industria se encuentran:
Corte
Barrenado
Grabado
Soldado
Tratamiento de superficies
Construcción de prototipos
Otras aplicaciones

2.8.1 El corte con láser

La idea del corte con láser surgió de la posibilidad de que este fuera enfocado en un spot tan pequeño, que si tuviéramos suficiente potencia del láser este se comportaría como una navaja. Los fenómenos implicados en varios tipos de corte son complicados, y difieren de un método a otro, pero en particular para el uso del láser este consta en

remover una pequeña cantidad del material en la zona del corte. De hecho, el único método de corte para el cual no hay pérdida de material es el verdadero corte con navaja, pero este es limitado a materiales blandos.

Los principales fenómenos implicados en el proceso de corte con láser son la fusión y la evaporización del material. Debido al hecho que el láser puede ser enfocado en un spot con dimensiones de decenas hasta cientos de micras, toda la energía del haz láser estará concentrada en una zona muy pequeña, haciendo que en esta zona el material llegue a la fusión o en ciertas condiciones, hasta a evaporarse. Las propiedades del enfoque del láser determinan que este mantenga su concentración lo que hace que la profundidad del corte sea limitada. Para piezas con espesores mucho mayores a esta distancia el corte ya no puede penetrar hasta el otro lado del material.

Generalmente, el proceso de corte con láser está acompañado por un chorro de aire de alta presión que se sopla en la zona de corte con la ayuda de unos dispositivos especiales que incluyen también la óptica para el enfoque del láser.

Ventajas que distinguen el proceso de corte con láser de otros:

- Velocidad muy alta (prácticamente es el corte más rápido que hay)
- Pocos esfuerzos mecánicos ejercidos sobre la pieza (no hay contacto mecánico) y la fijación de las piezas es sencilla.
- No hay desgaste de herramienta. La dureza del material es irrelevante. Sólo cuentan las propiedades ópticas y térmicas. Sin embargo el láser tiene un tiempo de vida limitado pero este es usualmente muy largo y depende solo del producto Potencia*Numero de horas.
- Bajo nivel de ruido, puesto que no hay fricción entre las piezas mecánicas. Las únicas fuentes de ruido son el gas que sale con alta velocidad del soplete, el sistema de enfriamiento del láser y los sistemas de ventilación (extractores).
- Se puede alcanzar un grado muy alto de automatización puesto que se puede cortar en cualquier dirección y sobre cualquier patrón de formas y perfiles. Los mo-

vimientos de la herramienta son fáciles de implementar como resultado de la falta de contacto mecánico.

- Una alta flexibilidad del sistema. No se necesitan cambios mayores para el cambio de patrón de corte puesto que estos cambios son principalmente en el software de control.

- Los cortes realizados con láser presentan muchas características que los hacen mucho mas atractivos para varias aplicaciones.

- Al ancho del corte es muy pequeño lo que implica pocas perdidas de material.
- El corte deja las orillas limpias y en muchos casos no se necesita limpiar o algún otro tratamiento para las siguientes etapas de trabajo. Si los parámetros de corte están bien ajustados la limpieza de las superficies cortadas es tan alta que estas pueden ser soldadas sin alguna otra preparación.
- Las deformaciones en la superficie de salida (levantamiento de capas) son pequeñas.

- Hay pocas limitaciones en lo que es el uso de los láseres para el corte pero esto puede determinar que este no sea escogido en ciertas aplicaciones:

- La profundidad de corte esta limitada a unos 10^{-20} mm determinada por las características de la propagación del láser y su potencia.
- Puede haber problemas en cortar varias capas de material sobrepuesta debido a que estas se pueden soldar entre si.
- Los costos de la instalación pueden ser elevados.
- El mantenimiento y el uso de las instalaciones requieren de personal especialmente calificado.

2.8.2 Marcas y grabados

Los láseres se utilizan para grabar códigos, números de serie, marcas y dibujos en varios productos.

En la industria, la forma tradicional utilizada para grabar códigos o números de serie consiste en servirse de algún tipo de punzón, lo cual en el mejor de los casos supone un procedimiento bastante engorroso. Además de la excesiva dureza de ciertos materiales, el punzón no logra causar la impresión deseada y llega incluso a sufrir daños. Por otra parte, resulta difícil automatizar dicho proceso, lo cual supone un grave problema en una industria cuyo fin es acelerar sus métodos de producción y que se encuentre sujeta, además, a un creciente número de normas gubernamentales destinadas a mejorar el control de los productos con métodos de codificación mas perfeccionados.

El láser puede grabar la superficie de cualquier material, independientemente de su dureza, sin dificultad alguna. Uno de los métodos consiste en utilizar una serie de pulsaciones breves e intensas, de forma que con cada una de ellas se elimine una pequeña cantidad de material, formando un punto sobre la superficie. Si se mueve la pieza adecuadamente, el resultado serán una serie de puntos que equivaldrán a un número de serie codificado. Los láseres utilizados para dichas operaciones pueden ser programados para que graben con gran rapidez un número diferente en cada pieza y prácticamente de cualquier tamaño. Los fabricantes de semiconductores los utilizan para grabar unos números minúsculos sobre las obleas de silicio que más adelante se convertirán en pastillas de circuitos integrados, de múltiples aplicaciones en la industria electrónica. Por otra parte, los fabricantes de automóviles se sirven también de ello para grabar números de serie sobre duras piezas de metal, a veces en lugares de difícil acceso, con el fin de ayudar a la policía a identificar coches robados.

Existe también otro sistema de grabación por láser en el cual la marca no se inscribe con una serie de puntos, sino con una línea continua. En algunos casos el procedi-

miento es similar al de grabación convencional, ya que el haz de luz elimina a su paso parte del material de la superficie que puede tratarse de madera o cualquier otro elemento.

2.8.3 El soldado con láser

El soldado con láser es uno de los procedimientos mas importantes y complejos de las aplicaciones de los láseres. A pesar de sus calidades evidentes, las técnicas de soldar con láser han encontrado dificultad en penetrar el mercado debido a la poca educación de los beneficiarios en este sentido y por la competencia con otros métodos tradicionales.

El láser ofrece ciertas ventajas con relación a las soldaduras convencionales autógena y eléctrica. Por una parte, no precisa que la atmósfera en la que se desarrolle sea especial, puede tratarse de aire corriente, una entre muchas combinaciones de gases especiales o incluso vacío. Además, puesto que no es necesario que haya contacto físico alguno, el haz puede soldar a través del cristal (por ejemplo en el interior de un tubo hermético) sin perjudicar el recipiente.

Para soldar se pueden utilizar láseres pulsados o de haz continuo, ya sean rubí, cristal de neodimio, YAG y neodimio o dióxido de carbono. Cuando se utilizan pulsaciones, éstas suelen ser de mayor duración que las usadas para perforar o cortar, con el fin de evacuar la energía en el tiempo y en el espacio para evitar la volatilización del material que debilitaría la soldadura. No obstante, cierta volatilización superficial es inevitable y, para eliminar el vapor producido, se acostumbra utilizar un chorro de gas inerte en la zona donde se practica la soldadura. Los láseres que producen un haz continuo, en particular los de dióxido de carbono, son los más idóneos para soldar, especialmente las planchas metálicas gruesas [5].

2.8.4 Lo que no funciona

Para muchas aplicaciones industriales el láser posiblemente constituya el descubrimiento más extraordinario. Sin embargo, hay actividades para las cuales está dotado de muy poca destreza. Ésta es una lección que mucha gente ha aprendido a costa de errores en los años transcurridos desde el invento del láser.

El láser es inútil para cortar comida. Corta los productos culinarios a la perfección, el problema estriba en que a continuación no hay quien quiera comérselos. Cuando los ingenieros de una empresa quisieron cortar pan, lo que consiguieron fueron tostadas. Intentaron cortar pescado crudo y acabó cocido. Perforaron caramelos y obtuvieron azúcar carbonizado.

El estudio de otras aplicaciones ha llegado a ir más lejos antes de demostrar su inutilidad. Una de ellas consistió en el uso de láseres para despedazar rocas en las minas o en la excavación de túneles. En los años 60 se comenzaron a conseguir algunos esperanzadores resultados que indicaban la posibilidad de que si se dirigía un has de alta potencia contra una roca se contribuiría a despedazarla para poderla extraer con mayor facilidad. Sin embargo otros estudios más avanzados probaron que la técnica no sería práctica.

2.9 Seguridad en el trabajo con láseres

El número de lesiones oculares y cutáneas, causadas por radiaciones accidentales de láser, está en aumento debido al creciente uso de láseres en aplicaciones industriales, quirúrgicas y científicas. Desde el punto de vista de los efectos, tanto físicos como biológicos, es imposible trazar una línea de separación precisa entre los láseres continuo y pulsado. El láser continuo es capaz de emitir radiación de forma continua mientras en láser pulsado libera su energía en forma de pulsos. La diferencia entre ambas es el tiem-

po de duración de la emisión láser. De acuerdo a la Norma Europea EN 60825, la duración mínima de la emisión, para ser considerado continuo, es de 0.25 s, que es la duración del reflejo palpebral. (El reflejo palpebral es una característica del ojo humano consistente en el cubrimiento del ojo por el párpado en 0.25 s como consecuencia de un estímulo luminoso suficientemente intenso) [6].

2.9.1 Clasificación de láseres (EN60825)

Los productos láser se agrupan en cuatro clases generales para las que se especifican los límites de emisión admisibles (LEAs).

Tabla 2.9. Clasificación de los láseres (EN60825)

	Láser	Daño	Riesgo	Material de control
Clase I	Sistemas láser que no pueden emitir radiación en exceso de los niveles máximos de exposición permitidos.	Ninguno	Ninguno	Etiquetas de peligro
Clase II	Láseres emisores de luz visible que no tienen suficiente potencia para producir daños por accidente, pero pueden producir daños por una observación directa del haz durante un período superior a 0.25 segundos.	Ocular	Crónico para exposiciones de 1,000 segundos	Carcasa protectora Etiquetas de peligro Indicadores de funcionamiento Gafas de protección
Clase IIIa	Láseres emisores de luz visible que no producen daños por observación indirecta, pero dañan la retina si se focalizan dentro del ojo.	Ocular	Crónico para exposiciones mayores de 0.25 segundos.	Controles de ingeniería. Gafas de protección. Controles administrativos Señales de peligro
Clase IIIb	Láseres que pueden producir daños por accidente si se observa directamente el haz o sus reflexiones en distintas ópticas	Ocular Cutáneo	Peligro agudo en contacto con el haz	Controles de ingeniería Gafas de protección Controles administrativos Señales de peligro
Clase IV	Sistemas láser que producen daños graves, por incidencia directa, indirecta ó reflexión difusa, en los ojos y la piel	Ocular Cutáneo	Peligro agudo en contacto con el haz por con su radiación difusa	Controles de ingeniería Gafas de protección Controles administrativos Señales de peligro

2.9.2 Cómo afecta la radiación al ojo humano.

La tabla 2.10 muestra las distintas radiaciones con sus respectivos intervalos de longitud de onda y las lesiones que pueden causar al ojo humano.

Tabla 2.10. Daños a los ojos de las radiaciones

UV-A (315-380 nm)	Niveles altos o exposiciones prolongadas pueden causar cataratas
UV-B (280-315 nm)	Cataratas, quemaduras cutáneas
UV-C (100-280 nm)	Daño de la córnea y el cristalino. Pérdida de visión
Luz azul (400-480 nm)	Daño de la retina, pérdida de visión
IR-A (700-1400 nm)	Daño de la retina
IR-B (1400-3000 nm)	Daño de la córnea y el cristalino
IR-C (3000 nm- 1 mm)	Quemaduras, pérdida de visión

La córnea es afectada por radiación ultravioleta –principalmente UV lejanos así como IR medios. El cristalino se ve dañado por los efectos de UV cercanos y por los infrarrojos, principalmente medios. Otros tipos de radiaciones peligrosas no son absorbidos por la córnea o el cristalino, sino que se focalizan directamente en la retina. Este puede ser el caso de la luz visible (daño foto-químico) así como IR cercano. La retina tiene una capacidad muy limitada de cicatrización incluso niveles bajos de energía pueden dañarla irreversiblemente. La radiación infrarroja puede actuar en conjunción con luz azul aumentando la posibilidad de daño foto-químico sobre la retina. Cuando el nivel de radiación es muy alto, si la temperatura de la córnea y el cristalino aumenta y su refrigeración mediante los vasos sanguíneos no es suficiente, los rayos infrarrojos pueden aumentar la posibilidad de daño de estos órganos por los rayos ultravioletas. Las enfermedades oftálmicas más comunes debido a estas radiaciones son queratitis, conjuntivitis y cataratas.

La queratitis es una inflamación de la cornea caracterizada por la infiltración con matidez de la superficie y disminución de la transparencia. Sus síntomas son dolor, la-

grimeo, fotofobia y disminución de la visión. Se distinguen tres variedades: superficial, profunda y úlcera de córnea. La conjuntivitis se produce cuando se inflama la conjuntiva, una delicada membrana que tapiza los párpados y cubre la porción anterior del globo ocular. Sus síntomas son el enrojecimiento por inyección vascular, molestias, secreciones diversas y fotofobia. Fotofobia significa "horror a la luz". Se trata de una sensación ocular desagradable que se experimenta bajo el efecto de la luz. Puede manifestarse en caso de cualquiera de las enfermedades oftálmicas externas como queratitis y conjuntivitis. Las cataratas se producen cuando el cristalino se vuelve opaco a causa de un proceso degenerativo de su tejido constitutivo. Se caracteriza por la aparición de una opacidad blanca o grisácea y por la disminución de la visión o visión de puntos y manchas negras. En casos extremos puede conducir a la pérdida completa de visión [6].

2.9.3 Protección individual contra la radiación láser.

Protectores oculares contra la radiación láser deben ser utilizados por toda persona que permanezca en las zonas donde se emplee un equipo láser. Los protectores han de ser adaptados al sistema de láser en uso. La no utilización de gafas de protección o la selección de unas gafas de protección inapropiadas para la aplicación específica puede causar una lesión ocular. Las gafas nunca deben utilizarse par la observación directa del haz láser.

Protectores oculares contra sistemas láser deben aportar el grado de protección apropiado en la longitud específica de onda, con el fin de optimizar la protección y la transmitancia de luz necesaria para que el usuario pueda realizar su trabajo de manera segura y eficaz. La acción filtrante es la capacidad de un filtro óptico para atenuar la radiación óptica en un intervalo determinado de longitudes de onda [6].

Para determinar el filtro apropiado hay que responder a las siguientes preguntas.

¿Cuál es la longitud de onda del sistema láser?

¿Qué potencia ó energía produce el sistema?

¿Es necesario ver una parte del haz reflejado para la aplicación?

¿Cuál es el ancho del pulso y la frecuencia de repetición?

¿Cuál es el diámetro del haz?

¿Qué tipo de riesgos de radiación secundario están involucrados?

¿Qué tipo de protector es necesario, por ejemplo gafas panorámicas a usar sobre gafas correctoras?

CAPITULO III

DESTEÑIDO Y CONTAMINANTES

Desteñido, como su nombre lo indica es el resultado cromático que obtienen las prendas después de someterse aun proceso de reducción del tinte que les da color.

3.1 Desteñido de Mezclilla tradicional

En la fábrica en donde se lleva a cabo el desteñido de mezclilla, y que nos sirve de referencia para obtener datos reales sobre el desteñido de mezclilla, por lo general solo se trabajan las mezclillas de colores: negro, índigo y azul cielo.

A continuación se describen los pasos que sigue el proceso de desteñido:

1. Se inspecciona la prenda para el control de calidad de la misma.

2. Se ponen en la lavadora aproximadamente 200 prendas de pantalones para adulto, la cantidad dependerá del peso de estas, con un nivel de agua de 600 litros, ahí se agrega el detergente dispersante de color. La duración de este paso de lavado es de 3 minutos a una temperatura de 60 grados centígrados

3. Se agrega la enzima para el desengome, se pone a lavar 10 minutos a una temperatura de 60 grados centígrados, terminando este paso se tira el agua utilizada.

4. En el siguiente pase que es el tallado, se vuelve a llenar la lavadora con 600 litros de agua, se pone otra enzima ahora para el desteñido, se le agrega ácido acético para ajustar el pH y así actúe la enzima, se agrega piedra pómez pulverizada para el desteñido de la prenda. Este proceso dura 45 minutos de lavado a una temperatura de 43°C, una vez terminado el proceso se tira el agua de la lavadora.

5. Se vuelve a llenar la lavadora con 1000 litros de agua, y se pone detergente dispersante de color, se realiza el lavado por 3 minutos a una temperatura de 43°C. Se tira el agua.

6. Se llena nuevamente la lavadora con 1000 litros de agua y se agrega detergente alcalino para neutralizar las enzimas y además cloro líquido para obtener el desteñido deseado en la prenda y se realiza el lavado por 3 minutos a una temperatura de 60°C, se tira el agua.

7. Se agregan 600 litro de agua en la lavadora, con peróxido para neutralizar el agua, se realiza el lavado por 5 minutos a una temperatura de 49°C, se tira el agua.

8. Se agregan 1000 litros de agua para realizar un enjuague por 3 minutos, después de este tiempo se tira el agua.

9. Para el ciclo de suavizado se agregan 600 litros de agua a la lavadora, así como un antiozono para que la prenda no tome un color amarillento debido al cloro, más ácido acético para ajustar el pH del suavizante. Se enjuaga por 8 minutos a una temperatura de 43°C.

Tabla 3.1. Pasos en el proceso de desteñido de mezclilla tradicional

Paso No.	Operación	Producto	Descripción y acción del producto	Producto en Kg	Agua en Litros	Temperatura del agua en °C	Tiempo en minutos
1	Desengome	Scrub	Detergente: Dispersante de color	0.319	600	60	
		Prep.-Des	Enzima: para desengome	1.064			10
2	Tallado	Buffer 4.5	Ácido acético: Ajusta el pH para que actúe la enzima	0.319	600	45	50
		Celite	Piedra pómez pulverizada	6.00			
		Spectrum	Enzima: Desteñido	1.330			
3	Enjuague	Scrub	Detergente: dispersante de color	0.319	1000		3
4	Blanquear	Scout L.P.	Detergente alcalino: neutraliza enzima	0.532	1000	60	3
5	Neutralizas	Peróxido	Peróxido: Neutralizar el agua	0.95	600	49	5
6	Enjuague				1000		3
7	Suavizar	Antiozono	Para que la prenda no tome el color amarillento por el cloro	0.319	600	43	5
		Ácido Acético	Ajustar el pH del suavizante	0.319			
		Sofá	Suavizar la prenda	3.724			
	Totales				5400		79

3.2 QUIMICA DEL DESTEÑIDO:

Descripción del Índigo:

El pigmento azul fue preparado de plantas hasta finales del siglo XIX. Desde 1870 se inició a manufacturarse sintéticamente. El pigmento tiene una muy buen fuerza de teñido y puede ser decolorado rápidamente cuando se expone a una luz solar muy fuerte [7-9].

Fuente de Índigo: La fuente más típica del índigo hasta finales del siglo XIX fue la planta el pastel que crece especialmente en Oriente. La primera síntesis del índigo la efectuó A. von Baeyer en 1882, después de diecisiete años de investigaciones. Adicionalmente fueron necesarios veinticinco años de esfuerzos para llegar a una síntesis industrial práctica [9].

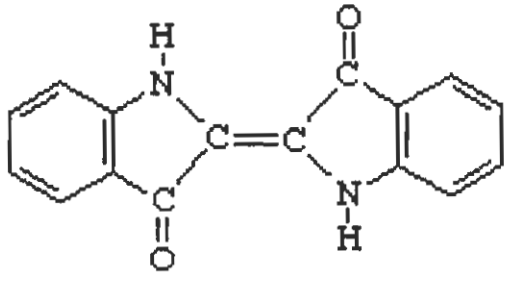
Los resultados de los trabajos efectuados, no sólo permitieron fabricar el índigo, sino también establecer métodos generales que han conducido a la preparación de un gran número de colorantes de la misma familia.

Origen de la palabra: El nombre de "Índigo" viene del griego *indicon* = de la india.

Su estructura química:

Nombre químico: 2,2′- Biindolinyliden-3,3′- dion

Formula:



Indigo

Figura 3.1. Formula del color índigo.

El color índigo presenta un enlace principalmente covalente, los cuales tienen energías de dislocación que van de 2.7 eV a 7.1 eV, como se muestra en la tabla 3.2 [10-12].

Tabla 3.2. Energías de dislocación de algunos enlaces químicos del índigo

Tipo de enlace	Energía de dislocación		
	Kcal/mol	kJ/mol	eV
C=O	164	685	7.1
C=C	148	618	6.4
N-H	95	396	4.1

La química del desteñido

Los colores que un objeto tiene son debido a la reflexión de cierta frecuencia de la luz y de la absorción de las otras frecuencias.

Cuando la energía de una fuente de luz golpea un objeto, la energía se transfiere a los electrones en ese objeto. Los electrones si reciben suficiente energía, saltan a un orbital más alto. Entonces emiten esa energía en forma de luz para volver a su orbita original.

Los tintes emiten su color particular debido a su estructura molecular, un cambio en la forma de las moléculas causa un cambio en el color reflejado.

Hay tres maneras básicas para que ocurra el desteñido con los tintes:

1. Rompimiento del doble enlace y reordenamiento de la forma molecular.
Los enlaces dobles pueden recibir suficiente energía no solo para saltar a un orbital más alto, pueden romper y dejar la molécula, dejando un solo enlace y dejar a la molécula sin los electrones para saltar a orbítales mas altos. Un cambio en los enlaces cambia la forma de la molécula.

2. Los enlaces pueden recibir suficiente energía para romperse totalmente, dividiendo la molécula en dos o más partes.
Con la descomposición de la molécula en diferentes partes, las pequeñas moléculas causarán un cambio de color, por lo tanto el desteñido.

3. Una pequeña cantidad de los tintes que son solubles al agua, pierden su adhesión a la prenda en el proceso de lavado. Estas moléculas son arrancadas de la prenda y después son enjuagadas. Este proceso es un proceso de desteñido lento, pero constante.

3.3 EL AGUA Y SUS CONTAMINANTES

Puede decirse que solamente a partir de la década de los 60, términos tales como la contaminación del aire y del agua, protección del medio ambiente, ecología..., pasaron a ser palabras de uso común. Antes de esas fechas los términos o bien pasaron desapercibidos para el ciudadano común, o a todo lo más eran bases para ideas confusas. Desde entonces, el género humano ha sido bombardeado continuamente por los medios de comunicación (Periódicos, radio, TV) con la terrible idea de que la humanidad estaba trabajando efectivamente para su autodestrucción, a través de procesos sistemáticos de contaminación del medio ambiente, con el fin de conseguir un progreso material.

El agua es sin duda el elemento distintivo de nuestro planeta, del total de las aguas del mismo, sólo una pequeña porción, el agua dulce, es utilizable para el sostenimiento de la vida. La apremiante necesidad de este vital liquido por la sociedad actual, tanto para su consumo como para producir sus satisfactores, ha ocasionado que su explotación se realice de una manera poco eficiente e irresponsable generando problemas de sobre explotación y contaminación.

La contaminación es un problema serio y es por supuesto deseable que seamos conscientes de ello. El instinto de conservación de las especies es una motivación básica para la humanidad, y el hombre está equipado para corregir el deterioro del medio ambiente antes de que sea demasiado tarde. De hecho, la corrección de la contaminación no es un problema técnico de gran dificultad comparado con otros, mucho más complejos, resueltos con éxito, tal como la exploración de la luna por el hombre. Esencialmente, el conocimiento técnico básico requerido para resolver el problema de la contaminación está ya a disposición del hombre y, en la medida en que quiera pagar un precio razonable por seguirlo, la pesadilla de la destrucción a través de la contaminación nunca se hará realidad. De hecho se han pagado precios muy superiores para desarrollar y mantener toda la maquinaria de guerra y armamento [13].

3.3.1 CLASIFICACION DE SUS CONTAMINANTES

De acuerdo con su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías: (1) aguas superficiales, (2) aguas subterráneas y (3) aguas meteorológicas. Las aguas superficiales comprenden los cauces (ríos), océanos, lagos y aguas embalsadas. Los causes de agua sometidos a contaminación presentan una calidad variable a lo largo del curso del cauce. Las aguas de los lagos y pantanos o embalses, por otro lado, tienen una calidad relativamente uniforme. Las aguas subterráneas muestran en general menor turbidez que las aguas superficiales. En cuanto a las aguas de lluvia, son de mucha mayor pureza física y química que las aguas superficiales y subterráneas.

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías: Químicos, físicos y biológicos. Los contaminantes químicos comprenden tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. El aspecto fundamental resultante de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución de oxígeno como resultante de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos. Esta disminución de oxígeno disuelto lleva a perturbaciones indeseables del medio y de la biota en ella asentada.

En el caso de la contaminación derivada de la presencia de compuestos inorgánicos el resultado más importante es su posible efecto tóxico, más que la disminución en oxígeno. Sin embargo, hay casos en los cuales los compuestos inorgánicos presentan una demanda de oxígeno, contribuyendo a la disminución del mismo. Los sulfitos y los nitritos, por ejemplo, toman oxígeno para oxidarse a sulfatos y nitratos, respectivamente. Los iones de metales pesados, tóxicos para los seres humanos, son importantes contaminantes de este grupo. Se presentan en las aguas residuales industriales resultado de las operaciones de tratamiento de superficies, así como de las industrias de fabricación de pigmentos y pinturas. Incluyen mercurio, arsénico, cobre, zinc, níquel, cromo, plomo, cadmio. Su presencia, aun en pequeñas cantidades (concentraciones mínimas detectables), puede causar serios problemas.

El mercurio es uno de los metales pesados que ha sido objeto de gran interés y divulgación. Los microorganismos convierten el ion mercurio a metilmercurio (CH_3Hg) o dimetilmercurio [$(CH_3)_2Hg$]. El dimetil, que es volátil, puede eventualmente pasar a la atmósfera. El metilmercurio, sin embargo, se absorbe en los tejidos de los peces y puede hacer que no sean adecuados para el consumo humano.

La contaminación por nitratos es también un aspecto peligroso; la metahemoglobinemia infantil (enfermedad azul) es el resultado de alta concentración de nitratos en aguas de abastecimiento. Los fluoruros por otro lado, parecen ser beneficiosos; su presencia en aguas potables en unas cantidades mínimas es responsable de la reducción de enfermedades de los dientes. Sin embargo, hay una controversia considerable en lo referente a si se debe o no añadir flúor en las aguas de abastecimiento, ya que es perjudicial a partir de ciertas cantidades.

Algunos contaminantes físicos incluyen:

- Cambio térmicos (contaminación térmica). Es el caso de aguas procedentes de plantas industriales, relativamente calientes después de haber sido utilizadas en los intercambiadores (enfriadores).
- El color (por ejemplo, los licores negros que se descargan procedentes de las plantas de fabricación de pasta química).
- Turbidez (originada por la descarga de aguas que contienen sólidos en suspensión).
- Espumas (detergentes tales como sulfonato de alquilbenceno (SAB) constituyen una causa importante de la formación de espumas).

Los contaminantes biológicos son los responsables de la transmisión de enfermedades en las aguas de abastecimiento. Algunas de las enfermedades que se transmiten por contaminación biológica son el cólera, las tifoideas, paratifoideas, etc.

Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Generalmente no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas residuales. Por las razones anteriores se han desarrollado una serie de métodos empíricos para evaluación de la concentración de contaminantes en aguas residuales, cuya aplicación no requiere un conocimiento completo de la composición química específica de las aguas residuales consideradas.

Las normas de calidad del agua se requieren para prevenir el deterioro ecológico en las cuencas hidrológicas del país, una de estas descargar es las que produce el sector textil. La industria textil genera desechos orgánicos e inorgánicos mezclados con aguas excedentes de los procesos de producción, así como aguas de servicio, las cuales, al ser descargadas en los cuerpos de agua, modifican las características fisicoquímicas y biológicas naturales de estos cuerpos, disminuyendo en consecuencia su capacidad de autodepuración.

Debido al tipo y la cantidad de contaminantes que caracterizan a las aguas residuales de la industria textil, sus descargas a los cuerpos de agua, además de impedir o limitar su uso, producen efectos adversos en los ecosistemas.

En la tabla 3.3 encontramos los principales parámetros que se miden al realizar el análisis de aguas residuales, en México se realiza a través de la norma ecológica NOM-002-ECOL-1996 [14].

Tabla 3.3. Parámetros de las aguas residuales

PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	**Unidades**	**Máximo Permisible**
Temperatura de campo	°C	40.00
pH de campo	Unidades de pH	5.5-10
Sólidos sedimentables	ml/L	10.00
Grasas y aceites	mg/L	100.00
Coduct. Eléctrica de campo	micromhos/cm	No especificado
Color	unidades Pt-Co	No especificado
DBO total	mg/L	60
DQO total	mg/L	No especificado
Sólidos suspendidos totales	mg/L	60
Materia flotante		Ausente
Detergentes S.A.A.M.	mg/L	No especificado
Coniformes totales	NMP/100 ml	No especificado

Es importante conocer la acción que tiene cada uno de los parámetros sobre el agua y que acción realiza en ella:

Temperatura: Afecta las actividades biológicas, la solubilidad de los gases y el efecto de la viscosidad sobre la sedimentación.

pH: Indica la concentración de iones hidrógeno. Es de suma importancia para la vida acuática, la salud pública, los procesos de tratamiento y los usos del agua. La determinación del pH de un desecho industrial puede dar indicaciones útiles respecto a su naturaleza. Es útil en la regulación de los procesos químicos de tratamiento de las aguas negras y en la regulación de la digestión anaeróbica de la materia orgánica.

Sólidos sedimentables: Son una indicación directa de los materiales que se pueden separar por simple sedimentación pues están formados por pedazos de finos materiales con

densidades mayores que la del agua, y constituyen una indicación de las características de facilidad de formación de lodo de las aguas negras. Es la materia suspendida que sedimenta en un cono imhoff después de un período de 60 minutos y su importancia reside en el asolvamiento que producen en los cuerpos de agua. Se expresan en ml/l.

Grasas y aceites: Es un parámetro que indica la concentración de sustancias grasas y oleosas contenidas en una muestra de agua. Son constituyentes nocivos de las aguas residuales, pues se precipitan en ellas y obstruyen los intersticios del material filtrante y forman una espuma objetable, en los depósitos y corrientes. No se oxidan fácilmente, esto ocasiona un descenso en la capacidad de autopurificación del agua y causa efectos nocivos para la vida acuática en general.

Conductividad eléctrica: La conductividad eléctrica es un parámetro muy importante, ya que cuanto mayor es el contenido de minerales en el agua, mayor será su conductividad. Por lo tanto, cuanto mayor es la conductividad, la corriente eléctrica fluye más libremente a través del agua y la velocidad de corrosión se acelera si existen las condiciones favorables.

Color: Es la coloración que toma el agua debido a la presencia de material colorido en estado coloidal y en suspensión. El color puede ser de dos tipos: el color aparente y el color verdadero. El color aparente es una pigmentación debida a la presencia de sólidos suspendidos en un abastecimiento de agua. El color verdadero es una pigmentación debida a la presencia de partículas o gotas finamente divididas en dispersión o en solución en un abastecimiento de agua.

Demanda bioquímica de oxígeno: DBO Total: Indica la presencia de materia orgánica acumulable por microorganismos y considera materia suspendida y disuelta. También se considera medio adecuado para el desarrollo de organismos patógenos. DBO Soluble: Corresponde a la cantidad de oxígeno disuelto consumido por microorganismos en un bioensayo de duración de 5 días a 20 °C, ese consumo tiene relación estequiométrica con la

materia orgánica presente que es asimilable. Este parámetro es un indicador del efecto de la descarga al balance de oxígeno en el cuerpo receptor y consecuente a la vida acuática.

Debido a que la DBO es la medida principal de la velocidad y la cantidad de descomposición, la relación de DBO a nitrógeno y fósforo es 32:1 y 150:1 respectivamente. Cuando la corriente receptora del flujo es suficiente para absorber el aumento de la DBO que provoca las altas concentraciones de materia orgánica, la dilución puede proporcionar una asimilación satisfactoria en la corriente y eliminar las zonas que presentan grandes deficiencias de oxígeno.

Si los sistemas de tratamiento de aguas residuales se encuentran operando, la carga de contaminación puede reducirse en forma apropiada después del tratamiento primario en un 30% y del tratamiento secundario en un 80%. En los procesos naturales de purificación de ríos y corrientes, las aguas negras y otras sustancias orgánicas se oxidan debido a la acción bacteriana, utilizando el oxígeno disuelto del agua. En esta forma, las aguas negras que penetran en una corriente eliminan el oxígeno disuelto que, cuando la contaminación es excesiva, dará como resultado la destrucción de la vida vegetal y animal, la DBO es la prueba que indica directamente la cantidad de oxígeno que consumirán los procesos naturales para estabilizar la materia orgánica.

Demanda química de oxígeno: La determinación de la DQO proporciona la medida del oxígeno que es equivalente a la porción de materia orgánica e inorgánica presente en una muestra de agua, capaz de oxidarse por procedimientos químicos (mediante una oxidación fuerte). Tiene como ventaja la rapidez conque se efectúa, ya que se requiere un máximo de tres horas para su valoración, sin embargo su gran desventaja es su limitación para diferenciar la materia biológicamente oxidable de la químicamente oxidable. Por regla general su valor siempre será mayor al de la DBO, ya que la materia oxidable bioquímicamente se puede oxidar también por procedimientos químicos, pero no toda la materia orgánica oxidable químicamente se oxida por microorganismos.

Sólidos suspendidos: Son pequeñísimas partículas de contaminantes en el agua, que contribuyen a su turbidez y que son perceptibles a simple vista, siendo factible su separación por procesos de sedimentación y/o filtración. Su valor se refiere a la cantidad de sólidos en solución, tanto de tipo orgánico, como inorgánico. Se dividen a su vez en Sólidos Suspendidos Fijos y Sólidos Suspendidos Volátiles.

Sólidos suspendidos fijos: Representan el contenido en materia inorgánica de las aguas residuales y debido a que no están sujetos a degradación (con excepción de los sulfatos que son degradados a sulfuros), se dice que los procesos de tratamiento de aguas residuales no los afectan y por lo general son compuestos minerales que producen dureza y contaminación mineral. Se expresan en mg/l.

Sólidos suspendidos volátiles: Se supone en general, que la porción volátil representa el contenido orgánico de las aguas residuales y tiene gran significado como índice de la concentración de las aguas negras, constituyen los elementos que mas fácilmente pueden entrar en putrefacción y en algunos de los casos los más difíciles de eliminar. Se dice que el grado de contaminación del agua residual, depende de la cantidad de sólidos orgánicos que contiene. Generalmente son carbohidratos, proteínas y grasas. Se expresan en mg/l.

Materia flotante: Obstruye el paso de la luz retardando el desarrollo de la vida acuática. Causa sabor desagradable (cuando existen grasas y aceites), destruye la vegetación de las orillas e interfiere con los usos recreativos.

Detergentes: Los agentes tensoactivos son usados en la formulación de los detergentes comerciales e industriales, contienen la mayoría compuestos de fósforo. Estos agentes son utilizados en la industria, especialmente en las del ramo alimenticio y en las actividades domésticas. Aceleran la eutroficación de los lagos, lagunas y en general cuerpos de agua afectados.

Coliformes totales y fecales: Son bacterias en forma de bastoncillos contenidos en la materia fecal del hombre y en algunos suelos. La presencia de organismos coliformes se interpreta como una indicación de que los organismos patógenos también pueden estar presentes y su ausencia indica que el agua se halla exenta de organismos productores de enfermedad. No solo incluye a los provenientes de heces humanas, sino también a los provenientes de los suelos y la vegetación y a un grupo de estreptococos fecales.

CAPITULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

4.1 Introducción:

La producción de pantalones de mezclilla desteñidos usando tecnología convencional produce grandes cantidades de agua contaminada, por lo que es importante buscar alternativas no contaminantes. La tecnología alternativa en este campo es la tecnología láser para el desteñido de mezclilla.

El proceso de desteñido de mezclilla con láser, se lleva acabo de la siguiente manera:

El haz láser se mueve a lo largo de la pieza a ser desteñida con un movimiento perpendicular controlado por una computadora. La interacción del láser con la mezclilla produce una decoloración en el área del material irradiada. El colorante residual es eliminado de la superficie del material.

El proceso de desteñido con láser tiene tres etapas:

1. Mapeo generado por computadora, del área que será irradiada con diferentes niveles de fluencia de acuerdo al patrón deseado.
2. Transmisión de los comandos al sistema láser y al sistema de escaneo.
3. Proceso de desteñido láser.

La interacción láser-material depende de dos tipos de parámetros: parámetros del haz láser y parámetros del material. Se consideraron como parámetros del haz láser la energía por pulso, la frecuencia de repetición, la duración del pulso, la longitud de onda. Como parámetros del material se consideró la difusividad térmica, el coeficiente de reflexión y el calor de vaporización.

Para remover material en materiales no-metálicos, es muy importante la absorción del material a la longitud de onda del láser. Por eso hay que tomar en cuenta el coeficiente de absorción del material a diferentes longitudes de onda, para poder seleccionar adecuadamente el láser a utilizar.

Además, la energía del láser se puede perder por reflexión de la superficie, o en este caso, por transmisión a través de las fibras textiles. Dependiendo de la duración del pulso, la longitud de onda y la densidad de potencia, pueden ocurrir varios fenómenos. La remoción del índigo (colorante utilizado para teñir mezclilla) sin que se afecte la tela, involucra cuatro fenómenos físicos: vaporización, fotoablación, ablación inducida por plasma y ondas de choque [11,15-16].

El proceso dominante en la remoción del color índigo con tecnología láser frecuentemente es solo vaporización, con la absorción de la energía láser de la superficie que es continuamente tratada. Conforme se incrementa la energía láser, el material alcanza rápidamente las condiciones para la vaporización y existe menos probabilidad para una conducción térmica. Se deberán tener precaución en el tiempo de interacción de láser con la tela, ya que este podría quemarla (figura 4.1).

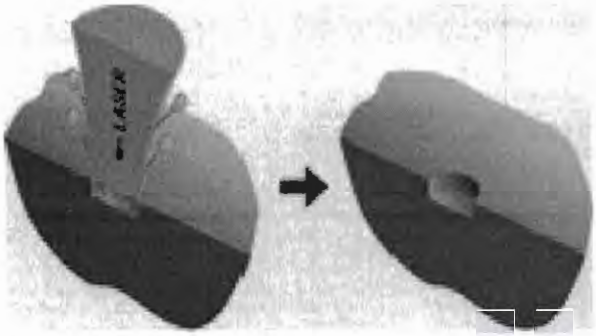


Figura 4.1. Fenómeno de vaporización.

El fenómeno de fotoablación, significa que la energía del fotón es absorbida por la banda dentro del polímero orgánico, el índigo en este caso, la cual es principalmente covalente. La energía mas baja de dislocación de las bandas del color índigo es mas alta que 2.7 eV. La energía del fotón para el láser de Nd:YAG es de 1.2 eV y 2.4 eV en el modo fundamental y el segundo armónico respectivamente. Por lo tanto, solo los fotones ultravioleta son capaces de producir fotodisociación. El uso del láser excimer podría ser posible, pero por razones practicas (mantenimiento, costos) solo se consideran los láseres de CO_2 (10.6 um) y Nd:YAG.

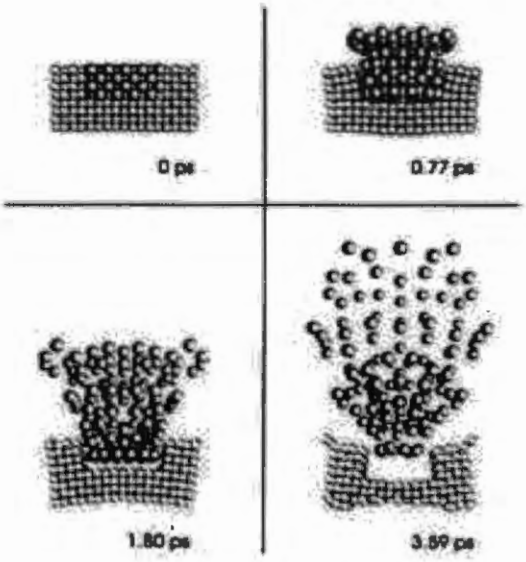


Figura 4.2. Fenómeno de Fotoablación.

La fotoablación inducida por plasma se obtiene cuando la densidad de potencia excede 10^{11} W/cm^2 en sólidos y fluidos o 10^{14} W/cm^2 en el aire donde ocurre el fenómeno llamado "rompimiento óptico". El brillo del plasma es claramente visible el cual se dirige a la fuente del láser. Si se aplican varios pulsos, se escucha un ruido típico a la frecuencia de repetición del pulso. Lo que significa que la ablación inducida por plasma, es un método muy limpio para la remoción del color índigo del material textil, ya que no hay evidencia de daño térmico o mecánico que pueda dañar la tela si se eligen los parámetros del láser apropiados. Los fenómenos asociados con "rompimiento optico" es la formación de plasma y la generación de choque de ondas.

El "rompimiento óptico" inducido por el láser, es acompañado por un repentino incremento adiabático en la temperatura del plasma a valores arriba de 10,000 K. Esta temperatura se atribuye principalmente a la energía cinética de los electrones libres. Debido a su alta energía cinética, el plasma de los electrones no es confinado en el foco del láser, mas bien se difunde en el medio circundante. El choque de ondas es generado cuando los iones siguen al plasma de electrones y se mueve la masa. Este choque de onda es separado rápidamente de la frontera del plasma. Este choque induce a un repentino incremento en la presión local y este gradiente de presión induce fuerzas mecánicas, Cuando estas fuerzas vencen la fuerza de adhesión del color índigo en la fibra textil, entonces el color índigo es removido y se obtiene una área desteñida.

4.2 Experimentos:

El principio para obtener el patrón de desteñido en una superficie textil fue el siguiente: Se realizó un barrido con la luz láser enfocada sobre el área a interaccionar, combinando dos movimientos perpendiculares, la cabeza del láser y la tabla. La imagen desteñida consiste de una imagen de líneas espaciadas. En el láser continuo las líneas son continuas, mientras que en el láser de modo pulsado, estas consisten de pequeños círculos parcialmente traslapados.

El láser continuo que se utilizó para los experimentos fue un láser de CO_2 a 10.6 μm, con las siguientes características:

Láser de CO_2 a 10.6 μm

Potencia	De 4 a 25 W
Velocidad de escaneo	5 – 10 pulgadas/segundo
Diámetro del Spot	500 μm a 2 mm

Variando la potencia, velocidad de escaneo y diámetro del spot se obtuvieron diferentes densidades de potencia y fluencias.

Para el caso del láser de Nd:YAG a 1064 nm, el desteñido se logró controlando el numero de pulsos que se hicieron incidir en cada punto. La irradiación fue hecha usando el láser con las siguientes características:

Láser Nd:YAG a 1064 nm

Energía por pulso	Hasta 8.5 mJ
Duración del pulso	Hasta 48 ns
Diámetro del Spot	168-280 μm
Numero de pulsos	Hasta 50

Variando la energía por pulso, duración del pulso y el diámetro del haz se lograron obtener diferentes valores de fluencia y densidad de potencia.

El equipo donde se llevaron acabo las pruebas de desteñido con láser de CO_2, se muestra en la figura 4.3, el cual es un sistema comercial modelo KER2424-25, marca Kern Electronics and Lasers, inc.

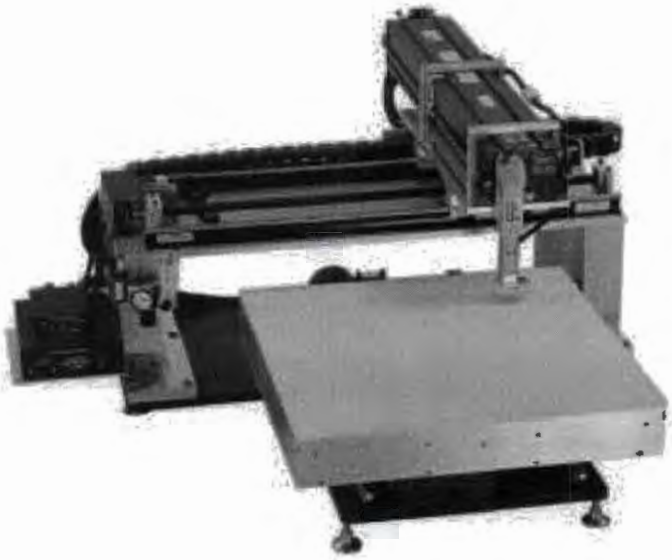


Figura 4.3. Sistema de grabado con láser

Después de la irradiación, las muestras fueron lavadas con agua sin detergentes, y secadas, para después medir los cambios de reflectancia, los cuales se realizaron utilizando un espectrofotómetro Perkin Elmer (Lambda 12) con precisión de 0.1 nm.

Con el objeto de comparar la calidad de la prenda obtenida con el tratamiento láser se llevaron acabo varias pruebas físicas.

Para determinar la calidad del agua obtenida en cada proceso, se llevaron acabo análisis de aguas residuales, tanto en el proceso tradicional, como con el desteñido con láser.

4.3 Resultados:

Para determinar el espectro de absorción del colorante índigo, se examinó con el espectrofotómetro una solución acuosa de índigo con una concentración de 0.001 g/mol. El espectro de absorción se muestra en la figura 4.4. De la grafica, el coeficiente de absorción a 532 nm es 37.2%, mientras que a 1064 nm es 4.6 %. Por esta razón la interacción láser-mezclilla es más efectiva a 532 nm. A mayores longitudes de onda, aumenta el coeficiente de absorción [17]. Esto significa que la interacción láser será mas efectiva a 10,6μm y 532 nm que a 1064 nm. Los dos parámetros más importantes para poder realizar la interacción láser con el tinte son la fluencia total del láser, F, y la densidad de potencia, D. Las cuales fueron calculadas para cada experimento usando la divergencia del haz, el diámetro del haz, energía por pulso y duración del pulso.

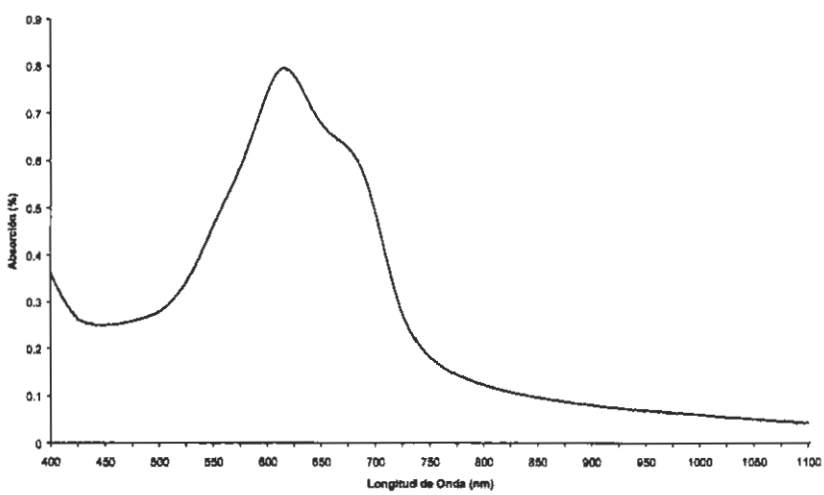


Figura 4.4. Espectro de absorción de una solución de color índigo acuosa con una concentración de 0.001 g/mol.

En el caso de la irradiación con láser de Nd:YAG, hubo un cambio notable en la reflectividad difusa del área de tela irradiada cuando la fluencia y la densidad de potencia

pasaron un nivel de umbral. El fenómeno involucrado fue fotoablación. Se observó la pluma del plasma y un sonido audible cuando el pulso láser interactuaba con la tela. A una longitud de onda de 532 nm el nivel de umbral para la fluencia fue de 40 J/cm^2 y la densidad de potencia fue de 100 MW/cm^2.

La figura 4.5 muestra espectros de reflectividad difusa para muestras irradiadas con láser de Nd:YAG a 532 nm. Se observa que para diferentes combinaciones de fluencia y densidad de potencia es posible obtener diferentes niveles de desteñido.

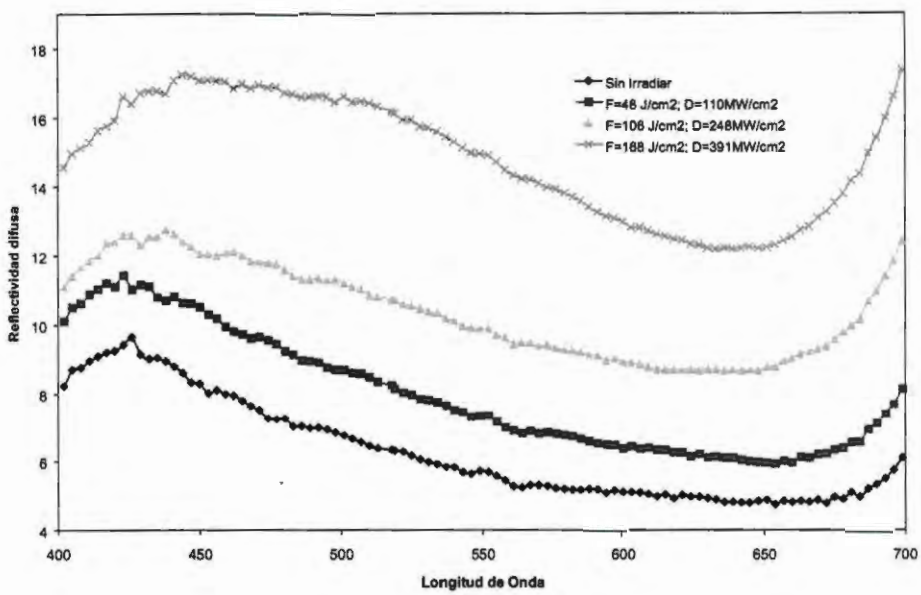


Figura 4.5. Espectro de Reflectividad difusa de muestras irradiadas con láser de Nd:YAG, λ= 532 nm.

En la figura 4.6 se presentan los espectros de reflectividad difusa para tela irradiada con el láser de Nd:YAG, λ= 1064 nm. De esta grafica se obtiene que las curvas que tienen la misma densidad de potencia y diferentes fluencias solo existe una pequeña diferencia entre sus espectros de reflectividad en el rango de longitud de onda medido.

Esto nos muestra que si variamos considerablemente la fluencia esta produce cambios pequeños en el coeficiente de reflectividad. Si comparamos las curvas con una fluencia de 714 J/cm^2 y 578 J/cm^2, la reflectividad es más alta en la segunda, lo que significa que la densidad de potencia (D) es mucho mas importante que la fluencia en el proceso de desteñido con láser. Esto puede ser explicado del hecho de que solo para el primer pulso del láser el coeficiente de absorción tiene su valor inicial, los pulsos que siguen a este encontrarán un coeficiente de absorción más bajo debido a que el color índigo fue removido de la superficie. Por lo tanto la eficiencia de la interacción depende de la densidad de potencia de los primeros pulsos.

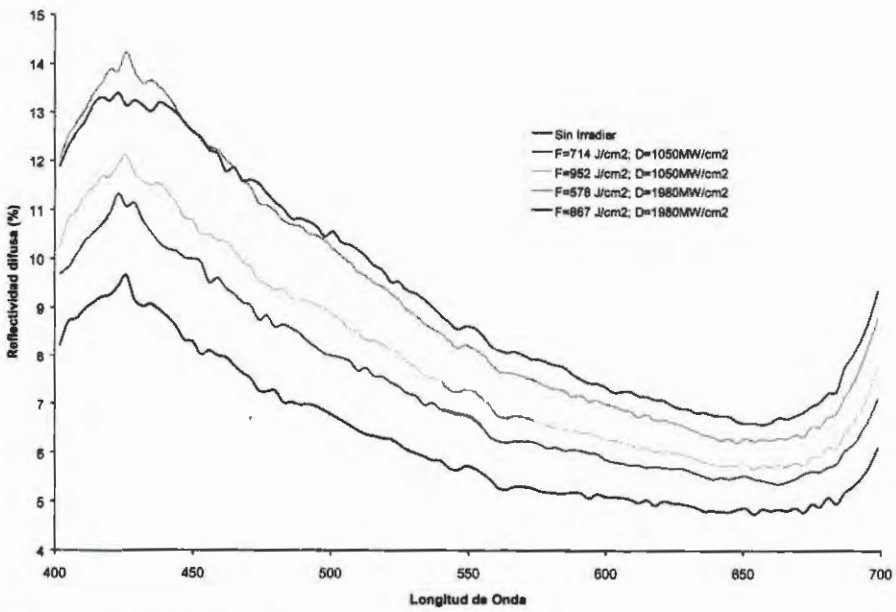


Figura 4.6. Espectro de reflectividad difusa para una muestra textil irradiada por el láser de Nd:YAG, λ= 1064 nm.

En el caso de la irradiación con láser de Nd:YAG a 1064 nm, es necesario llegar a niveles de fluencia y densidad de potencia más altos que en el caso del láser a longitud de onda a 532 nm, para obtener los mismos niveles de desteñido.

Seleccionando diferentes combinaciones de fluencia y densidad de potencia podemos obtener una área desteñida con el mismo coeficiente de reflectividad difusa (ver figura 4.7).

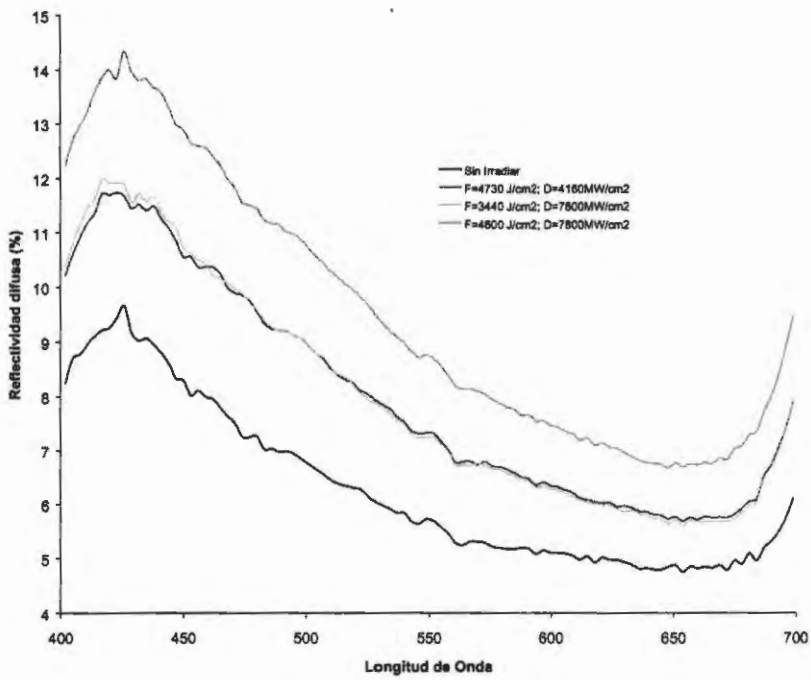


Figura 4.7. Espectro de reflectividad difusa de una muestra irradiada por láser de Nd:YAG, λ= 1064 nm.

El hecho de que la reflectividad tiene variaciones muy pequeñas sobre un rango de valores de fluencia se muestra en la figura 4.8. Existe un umbral de fluencia para lograr el cambio en la reflectividad, pero después de alcanzado este, el incremento en la fluencia no incrementa la reflectividad significativamente.

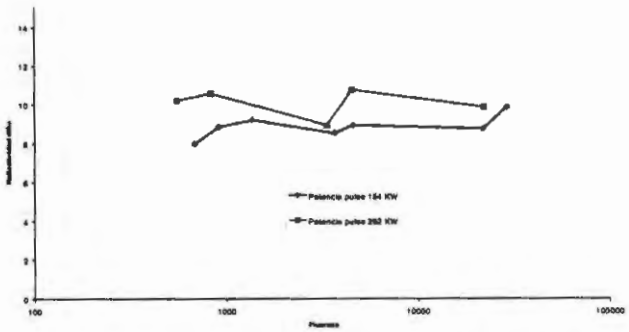


Figura 4.8. Variación del espectro de reflectividad difusa con la fluencia láser; λ= 1064 nm.

La figura 4.9 muestra los resultados obtenidos para la irradiación con láser de CO_2. El proceso de interacción en este caso es mucho más selectivo y la remoción del índigo se efectúa a través de los procesos de calentamiento y vaporización.

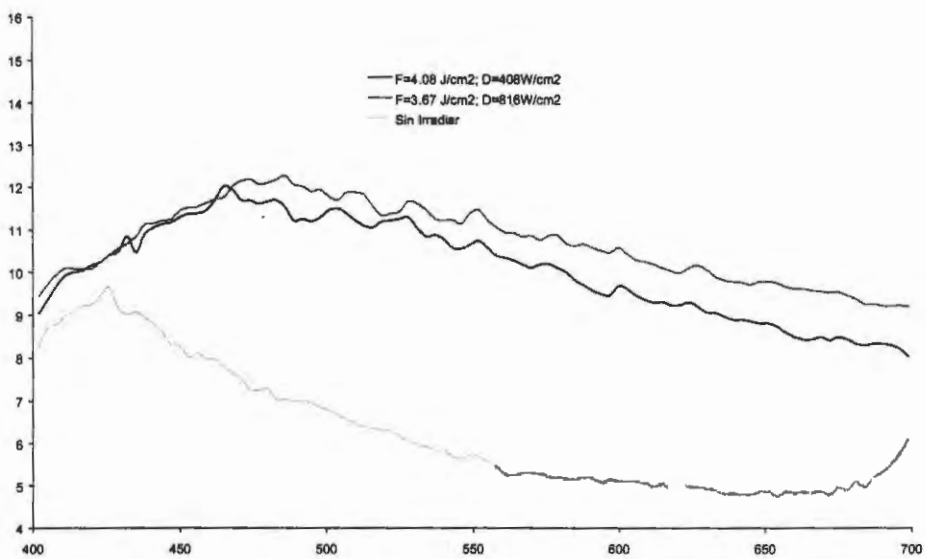


Figura 4.9. Espectro de reflectividad difusa de una muestra textil irradiada con láser de CO_2, λ= 10.6 μm.

En la figura 4.9, la curva que tiene una densidad de potencia D=816 W/cm^2 y una fluencia F=3.67 J/cm^2 tiene un mayor coeficiente de reflectividad que la curva que tiene una fluencia mayor (D= 408 W/cm^2 y F=4.08 J/cm^2), por lo que la observación de que la densidad de potencia es más importante que la fluencia continúa siendo válida en este caso.

En la figura 4.10 se presentan los espectros de reflectividad difusa para las tres diferentes longitudes de onda. De las curvas obtenidas usando la longitud de onda fundamental y el segundo armónico del láser de Nd:YAG (1064 nm y 532 nm, respectivamente). Los valores de fluencia y densidad de potencia (F=168 J/cm^2 y D=391 MW/cm^2) de la curva obtenida al irradiar con 1064 nm son menores que los respectivos para la curva obtenida al irradiar con 532 nm (F=867 J/cm^2 y D=1980 MW/cm^2). Sin embargo, el coeficiente de reflectividad difusa es mayor en el caso de la irradiación a 532 nm que a 1064 nm. Por ello se puede decir que los parámetros más importantes en el desteñido con láser son principalmente la longitud de onda del láser y enseguida la densidad de potencia del mismo.

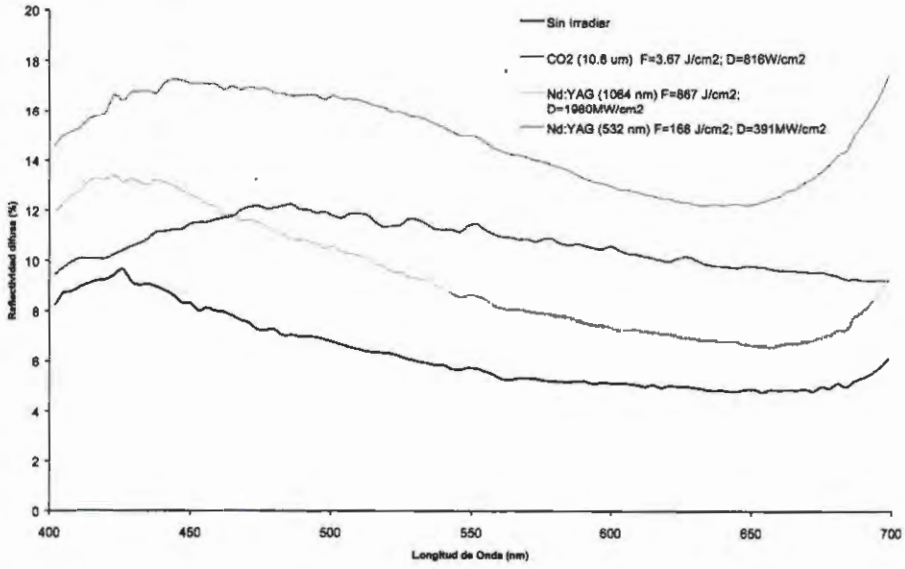


Figura 4.10. Espectros de reflectividad difusa para muestras irradiadas con tres longitudes de onda diferentes.

Para comparar la calidad de la prenda obtenida con la radiación láser, se llevaron acabo pruebas físicas y de solideces a dos muestras de mezclilla, una deslavada con el proceso convencional y otra por láser [19].

Las pruebas se llevaron acabo bajo normas nacionales e internacionales en los laboratorios del Centro de Tecnología Textil de Aguascalientes.

Solideces de Color

En las pruebas a) a e), los resultados se evalúan utilizando la escala de grises para el cambio y la transferencia de color.

La escala de grises para el cambio de color es utilizada en una evaluación visual del cambio de color en una muestra textil sometida a una prueba de solidez. La solidez de grado 5 representa que no hay cambio de color de la muestra al someterla a la prueba. Los grados 4.5 a 1 representan un cambio en el color, siendo el grado 1 un cambio de color casi total.

En la escala de transferencia de color el grado 5 representa que no hay transferencia de color, los grados 4.5 a 1 representan diferentes grados de transferencia, siendo 1 donde la transferencia de color es total.

a) **Solidez del Color al Lavado**. AATCC Test Method 61-1996. Colorfastness to laundering, home and commercial: Accelerated. Method 2A

Tabla 4.1. Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises

ANALISIS		OBS.	
Muestra	Unidades	Evaluación 1	Evaluación 2
Tratada con Láser	Cambio de color	4-5	4-5
Convencional	Cambio de color	4-5	5

Tabla 4.2. Evaluación de la Transferencia de color en la Escala de Grises

Análisis		Lana		Acrílico		Poliéster		Nylon		Algodón		Acetato	
Muestra	Unidades	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2
Tratada con láser	Transferencia de color	5	5	5	5	5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
Convencional	Transferencia de color	5	5	5	5	5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5

b) **Solidez del Color al Sudor**. AATCC Test Method 15-1997 Colorfastness to Perspiration.

Tabla 4.3. Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises

Análisis		Obs.	
Muestra	Unidades	Evaluación 1	Evaluación 2
Tratada con láser	Cambio de color	4-5	4-5
Convencional	Cambio de color	4-5	4-5

Tabla 4.4. Evaluación de la Transferencia de Color en la Escala de Grises

Análisis		Lana		Acrílico		Poliéster		Nylon		Algodón		Acetato	
Muestra	Unidades	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2
Tratada con láser	Transferencia de color	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Convencional	Transferencia de color	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

c) **Solidez del Color al Agua**. AATCC Test Method 107 1995. Colorfastness to water

Tabla 4.5. Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises

Análisis	
Muestra	Unidades
Tratada con láser	Cambio de color
Convencional	Cambio de color

Obs.	
Evaluación 1	Evaluación 2
4-5	4-5
4-5	5

Tabla 4.6. Evaluación de la Transferencia de Color en la Escala de Grises

Análisis		Lana		Acrílico		Poliéster		Nylon		Algodón		Acetato	
Muestra	Unidades	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2	E 1	E 2
Tratada con láser	Transferencia de color	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Convencional	Transferencia de color	5	5	5	5	5	5	4-5	4-5	5	5	5	5

d) **Solidez del Color al Frote**. AATCC Test Method 8 1995. Colorfastness to Crocking.

Tabla 4.7. Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises

Análisis		Seco		Húmedo	
Muestra	Unidades	Ev. 1	Ev. 2	Ev. 1	Ev. 2
Tratada con láser	Transferencia de color	4	4	3	3
Convencional	Transferencia de color	4-5	4-5	3	3

e) **Solidez del Color a la Luz**. AATCC Test Method 107 1995. colorfastness to light

Tabla 4.8. Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises

Análisis		Obs.	
Muestra	Unidades	Evaluación 1	Evaluación 2
Tratada con láser	Cambio de color	4-5	4-5
Convencional	Cambio de color	4-5	4-5

Pruebas Físicas de Durabilidad

a) **Resistencia a la Tracción**. NMX-A-059-19997-INNTEX Parte 2. Método de prueba para determinar la resistencia a la tracción de los tejidos de calada. Método de la tira.

Tabla 4.9. Resistencia a la tracción

Análisis		Trama			Urdimbre		
Prueba / técnica	Unidad	Promedio	Desv. Std	Q 95%	Promedio	Desv. Std	Q 95%
Tenacidad Tratada con láser	N	723.51	32.62	81.04	939.82	59.69	148.29
Tenacidad Convencional	N	551.34	60.31	149.84	1044.45	68.91	171.19
Elongación Tratada con láser	%	21.90	0.74	1.85	40.37	0.31	0.78
Elongación Convencional	%	19.79	0.12	0.29	40.04	1.60	3.98

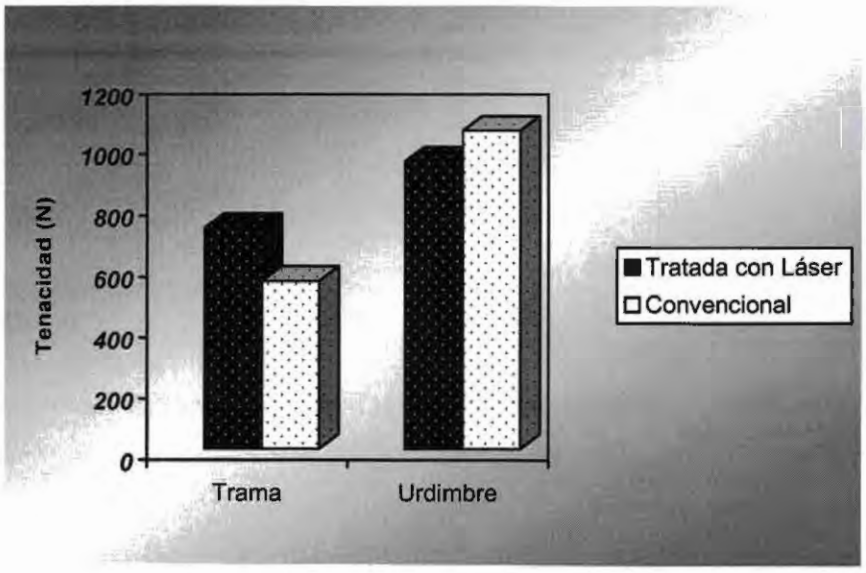


Figura 4.11. Resistencia a la tracción, tenacidad (N).

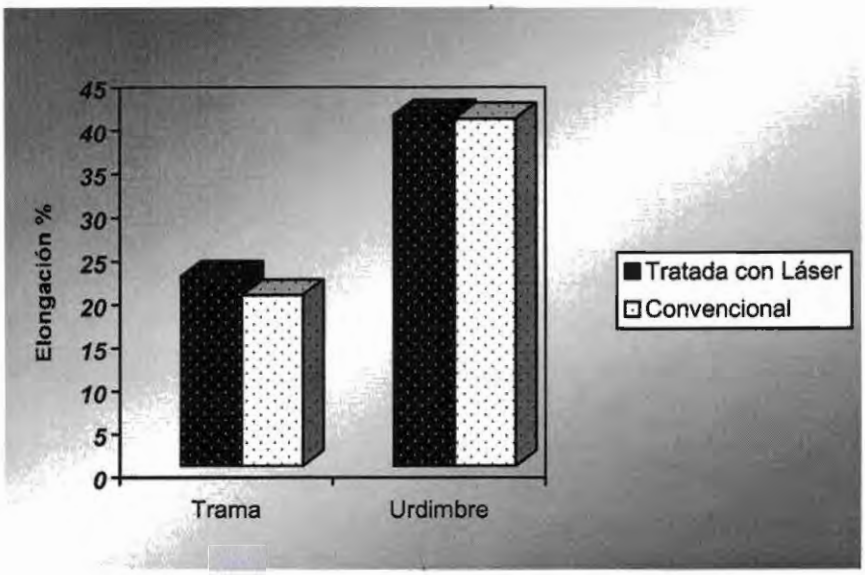


Figura 4.12. Resistencia a la tracción, elongación (%).

b) **Resistencia al rasgado**. ASTM D 2261-96 Standard test method for tearing strength of fabrics by the tongue (single rip) procedure (Constant Rate of- Extension Testing Machine).

Tabla 4.10. Resistencia al rasgado

Análisis		Trama			Urdimbre		
Prueba / técnica	Unidad	Promedio	Desv. Std	Q 95%	Promedio	Desv. std	Q 95%
Fuerza Tratada con láser	N	78.94	1.53	3.81	59.62	4.01	9.97
Fuerza Con-vencional	N	59.14	1.10	2.74	46.41	0.60	1.48

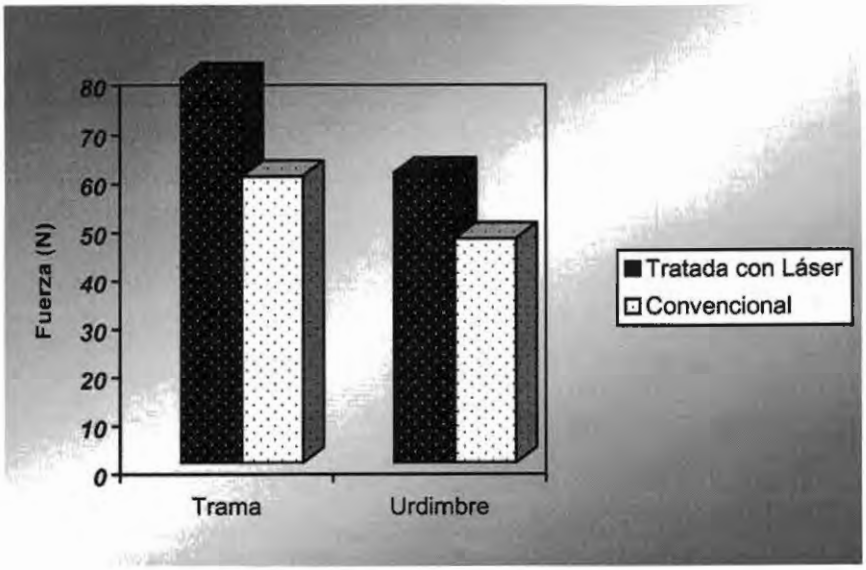


Figura 4.13. Resistencia al rasgado, fuerza (N).

c) **Estabilidad Dimensional**. AATCC Test Meted 135-1995. Dimensional Changes in Automatic Home Laundering of Woven and Knit Fabrics.

Tabla 4.11. Estabilidad dimensional

Cambio Dimensional AATCC-135-1995	Tratada con Láser		Convencional	
	Trama	Urdimbre	Trama	Urdimbre
	% Encog.	% Encog.	% Encog.	% Encog.
1°. Ciclo Lavado	-0.2	-0.5	-0.5	-0.7
2°. Ciclo Lavado	-0.5	-1.0	-0.7	-1.1
3°. Ciclo Lavado	-0.5	-1.0	-0.8	-1.2
4°. Ciclo Lavado	-0.6	-1.1	-0.9	-1.8
5°. Ciclo Lavado	-0.6	-1.2	-0.9	-1.8

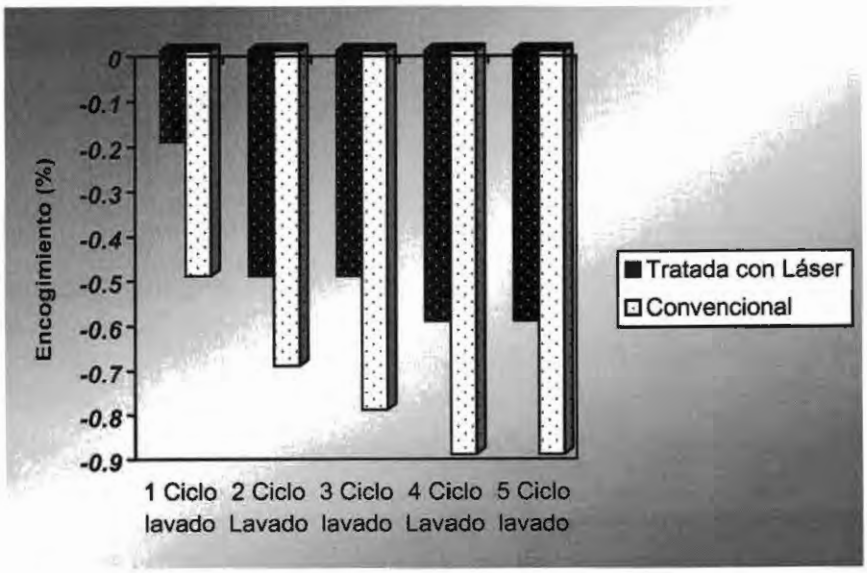


Figura 4.14. Estabilidad dimensional de la trama, encogimiento (%).

En cuanto a solidez de color, ambas telas se comportan igual. Sin embargo en cuanto a durabilidad, específicamente en la resistencia a la tracción y al rasgado, se encontró que la mezclilla tratada con láser tiene mayores resistencias que la convencional. En principio, el tratamiento con láser daña menos a la tela que la tratada convencionalmente.

En las tablas 4.12 y 4.13 se resumen las características de los procesos de desteñido utilizando la tecnología láser.

Tabla 4.12. Características del proceso de desteñido con láser de CO_2

Muestra	Densidad de potencia D_p (kW/cm^2)	Fluencia por paso F (J/cm^2)	Fluencia promedio F_m(J/cm^2)	Eficiencia η_v(cm^2/sW)
Muestra 1	1.535	4.55	3.55	0.28
Muestra 2	1.535	5.46	4.25	0.23
Muestra 3	0.812	5.1	20.4	0.05

Tabla 4.13. Características del proceso de desteñido con láser de Nd:YAG

Muestra	Densidad de potencia D_p (kW/cm^2)	Fluencia por paso F (J/cm^2)	Fluencia pro-medio F_m(J/cm^2)	Eficiencia η_v(cm^2/sW)
Longitud de onda 1064 nm				
Muestra 1	326 000	761	138.5	0.007
Muestra 2	480 000	276	67.9	0.015
Longitud de onda 532 nm				
Muestra 1	178 000	105.1	35.7	0.028
Muestra 2	205 000	71.4	19.28	0.052
Muestra 3	155 000	95.2	34.2	0.029

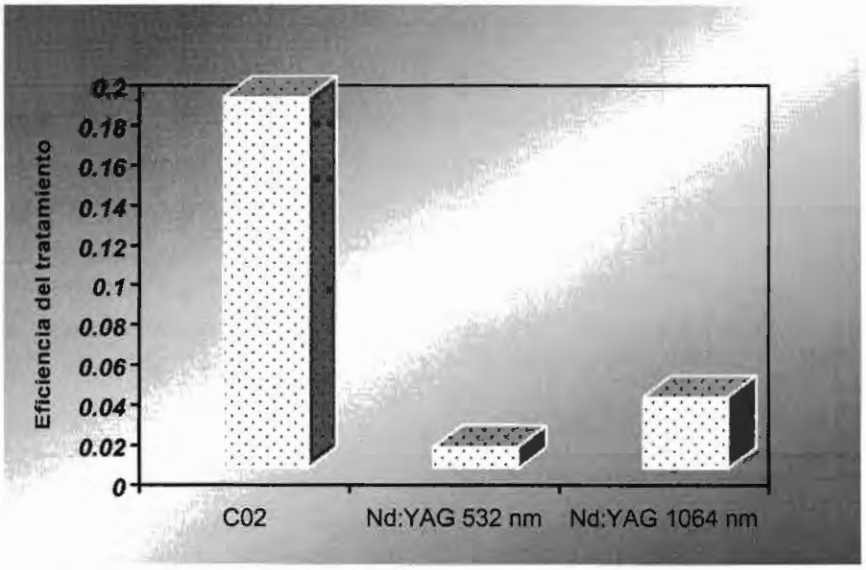


Figura 4.15. Eficiencia del tratamiento superficial a la tela.

Analizando las tablas que sintetizan las características de los procesos de desteñido que se pueden obtener con los tres tipos de láseres estudiados, se puede observar que el proceso con mayor eficiencia es el que utiliza el láser de CO_2 en continuo.

A través del Laboratorio de Análisis del Área de Ciencia de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se realizaron análisis de aguas residuales tanto de una muestra de agua obtenida en la planta donde se lleva acabo el desteñido tradicional, como con una muestra de agua obtenida al realizar un lavado a la muestra desteñida con láser, utilizando la norma NOM-002-ECOL-1996. Con los siguientes resultados:

De la tabla 4.14, se obtiene una reducción del 100% en los sólidos sedimentables, estos sólidos como se vio en el capitulo III, pueden formar lodos en el agua y producir asolvamientos. También se obtuvo una reducción del 100% en las grasas y aceites las cuales ocasionan un descenso en la capacidad de autopurificación del agua.

Tabla 4.14. Resultados de análisis de aguas residuales

PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	**Unidades**	**Tratada con Láser**	**Convencional**	**Reducción %**
Temperatura de campo	°C	23.2	41.20	
pH de campo	Unidades de pH	6.8	7.70	
Sólidos sedimentables	ml/L	0.0	5.00	100%
Grasas y aceites	mg/L	0.0	26.89	100%
Coduct. Eléctrica de campo	micromhos/cm	224	1786.00	86%
Color	unidades Pt-Co	36	46	22%
DBO total	mg/L	0.0	55.48	100%
DQO total	mg/L	0.0	430.00	100%
Sólidos suspendidos totales	mg/L	112	228.00	50%

Materia flotante		Ausente	Presente	
Detergentes S.A.A.M.	mg/L	0.0	41.40	100%
Coniformes totales	NMP/100 ml	<3	<3	

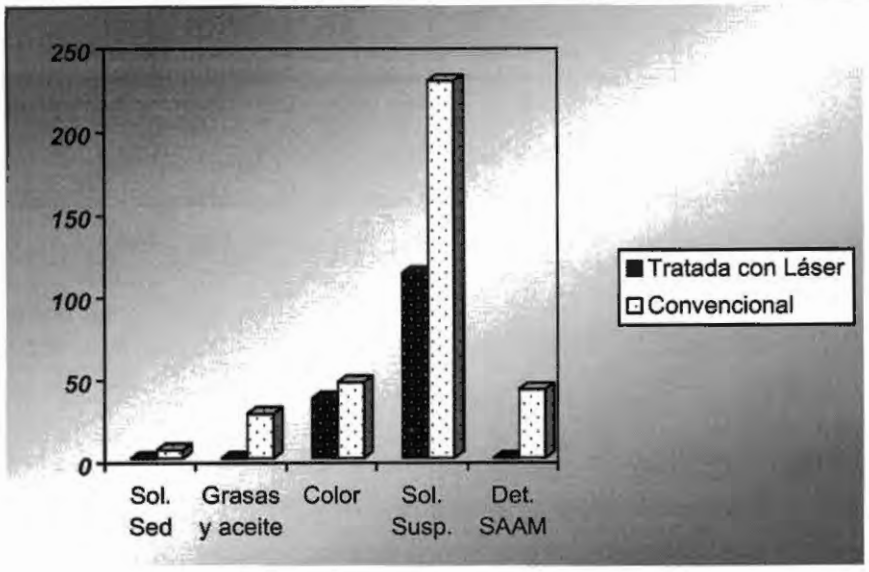


Figura 4.16. Análisis de aguas residuales.

La conductividad eléctrica se redujo un 86%, lo que indica una presencia menor de minerales en el agua, así como una reducción del 50% en los sólidos suspendidos los cuales son partículas contaminantes que contribuyen a la turbidez del agua.

En general, se obtiene un agua más limpia durante el tratamiento con láser, lo que implica procesos de purificación más sencillos.

CAPITULO V

ESTUDIO ECONOMICO:

Un análisis de justificación de costos de los beneficios de incorporar la tecnología láser en el acabado de las prendas, deberá incluir los ahorros tangibles e intangibles. No solo se deben considerar los ahorros tangibles, ya que los ahorros intangibles pueden ser también significantes. Como ahorros tangibles tenemos: reducción de mano de obra, reducción de tiempo muerto durante el mantenimiento y reparación, reducción o eliminación de costos de herramientas, y reducción o eliminación de los costos de la disposición de los materiales consumibles. El ahorro intangible se puede encontrar en algunas áreas del proceso de manufactura, tales como las mejoras en la calidad y confiabilidad, producción eficiente y flexible, incremento del servicio y la satisfacción del cliente, mejoramiento de la posición competitiva con nuevas tecnologías, sensibilidad al mercado con ciclos de producción mas cortos, y la capacidad de responder de una manera mas rápida y en corto tiempo a los cambios a la demanda del mercado.

Para realizar el estudio económico se contempló la producción de una prenda con un efecto de sandblast en un área de 50x50 cm= 0.25 m^2 por prenda.

Tabla 5.1. Estudio económico utilizando una maquina de sandblast.

Costo de operación			**Costo diario**	**Porcentaje**
Mano de obra				
	Operarios		$ 600.00	6%
	Mantenimiento		$ 27.00	0.3%
Materiales y suministros				
	Energía		$ 153.00	2%
	Abrasivos		$ 8910.00	90%
	SUBTOTAL		$ 9690.00	98.3%
Costos financieros:				
Maquinaria y Equipo				
	Equipo de Sandblsat	$ 275,000.00		
	Depreciación 20% anual		$ 150.00	1.5%
	Gastos de instalación	$ 20,000.00		
	Amortización 20% anual		$ 11.00	0.2%
	SUBTOTAL		$ 161.00	1.7%
	TOTAL		**$ 9851.00**	**100 %**
Producción total 2016 prendas				
	COSTO POR PRENDA		**$ 4.88**	

Costo de energía eléctrica (kWh)	
Tarifa base	$ 0.53
Tarifa Intermedia	$ 0.61
Tarifa punta	$ 2.26

Tabla 5.2. Estudio económico utilizando la tecnología láser.

Costo de operación			**Costos diario**	**Porcentaje**
Mano de obra				
	Operarios		$ 800.00	51.52%
	Mantenimiento		$ 27.00	1.73%
Materiales y suministros				
	Energía		$ 191.10	12.30%
	SUBTOTAL		$ 1018.10	65.55%
Costos financieros:				
Maquinaria y Equipo				
	Láser	$ 605,000.00		
	Depreciación 20% anual		$ 331.50	21.40%
	Gastos de instalación	$ 20,000.00		
	Amortización 20%		$ 11.00	0.70%
	Equipo adicional	$ 132,000.00		
	Depreciación 20% Anual		$ 72.00	4.63%
	Depreciación 33% Anual		$ 120.00	7.72%
	SUBTOTAL		$ 534.50	34.45%
	TOTAL		**$ 1552.60**	**100 %**
Producción total 6912 prendas				
	COSTO POR PRENDA		**$ 0.23**	
Equipo adicional				
Recarga del CO_2		$ 132,000.00		

De este estudio económico podemos concluir que en el proceso utilizando el láser es económicamente viable, ya que se obtiene un ahorro del 95%. Además de un aumento en la productividad de ≈ 340%, dependiendo del patrón a procesar, así como la habilidad para replicar un patrón dado al 100% de las unidades requeridas.

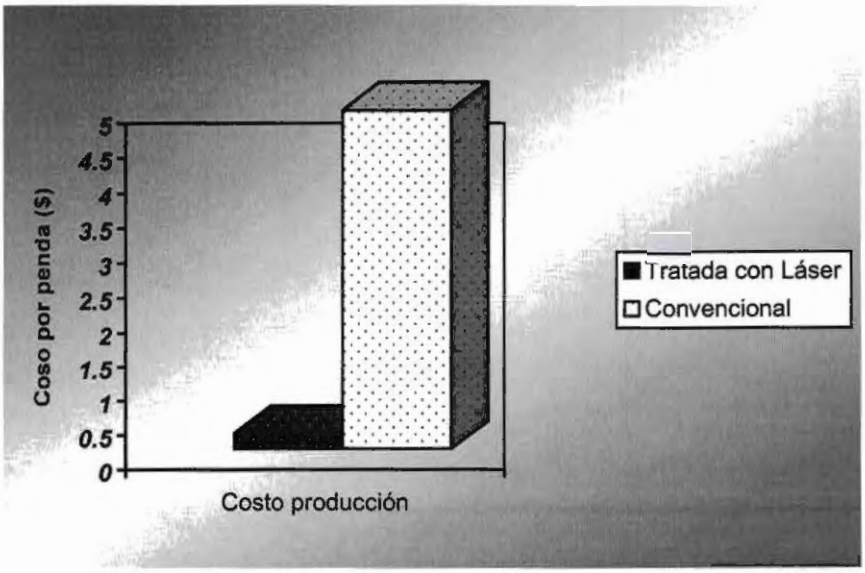


Figura 5.1. Costos de producción.

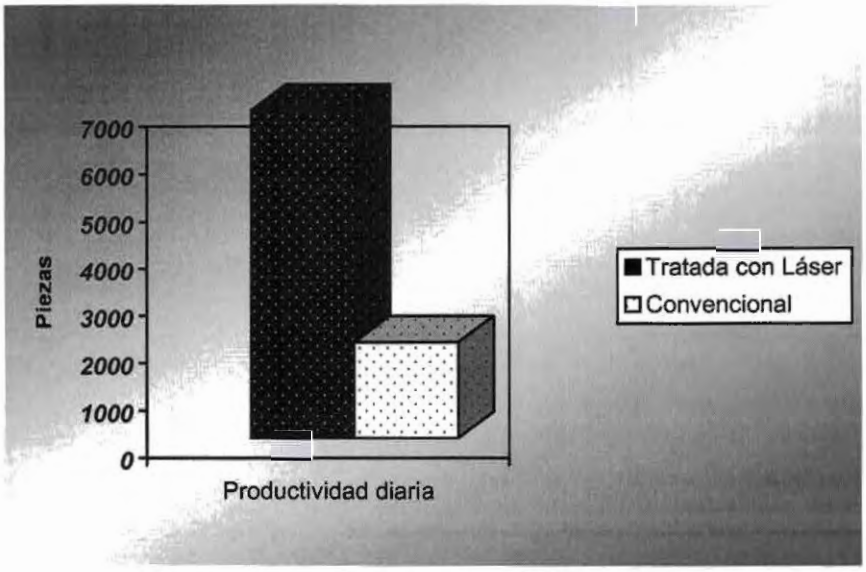


Figura 5.2. Productividad diaria.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales demuestran que el proceso de desteñido con láser es posible y se presenta como un buen competidor de la tecnología convencional. Además de los resultados obtenidos se demuestra que con el uso del láser para el desteñido se pueden obtener prendas de la misma calidad y en algunas pruebas mejor que con el desteñido convencional.

El láser de CO_2 constituye una alternativa viable al proceso tradicional debido a las características de su interacción. Para otro tipo de láseres que pueden ser viables el equipamiento es exagerado y el costo de inversión es muy alto, sumando a esto los costos de energía y mantenimiento. Mientras que el láser de CO_2 tiene muy alta eficiencia en cuanto al gasto de energía eléctrica (estos láseres llegan a una eficiencia del 10%). Un gasto menor de energía determina también menor cantidad de calor generado y como consecuencia sistemas de enfriamiento más pequeños, más baratos o menor cantidad de agua (reciclable) para el caso de un enfriamiento de este tipo. Con los resultados obtenidos, se ha determinado que un láser de CO_2 con potencia de 1 kW, nos puede dar una productividad diaria de 1500 prendas desteñidas en 24 horas.

Otros beneficios importante que tiene este método de desteñido es el poder replicar un padrón exacto de desteñido en el 100% de las prendas tratadas, y el empresario

pueda ofrecer el mismo desteñido para futuros lotes de prendas. También tiene la flexibilidad de crear nuevos diseños y mantenerse en el mercado tan cambiante.

Con este sistema para el desteñido con láser, se puede obtener un ahorro de agua de un 60%, además de una reducción considerable de elementos contaminantes contenidos en al agua residual que en algunos casos alcanza el 100%.

El estudio económico comparativo realizado indica que este método ahorraría un 95% en los costos de producción y aumentaría la capacidad de producción en un 340%.

TRABAJO A FUTURO:

Si bien, se ha logrado desarrollar un método de desteñido de mezclilla más limpio y la producción de prendas de mejor calidad, es necesario llevar acabo investigaciones de interacción del haz láser con mezclilla engomada y obtener el tipo de láser y los parámetros adecuados para realizarla en este tipo de tela, eliminando así el desengome.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Hecht Jeff, The Laser Guide Book, Second edition, McGraw-Hill, USA, 1992.

[2] Malacara Daniel, Óptica Básica, Fondo de Cultura Económica, México, 1989.

[3] Migliore Leonard, Laser Materials Processing, Marcel Dekker, Inc, USA, 1996

[4] Heckt Jeff, Understanding Lasers, IEEE press, USA, 1992.

[5] Steen W. Laser Material Processing. London: Springer, 1998.

[6] *Seguridad en el trabajo con láser* obtenido en http://www.lasing.com/wizzn.html

[7] *The chemistry of fading* obtenido en http://www.hs.wisd.org/ddaughenbaugh/Notes/chemistry_of_fading.htm

[8] Shore John, Colorants and Auxiliaries, Organic chemistry and application properties, Vol I Colorants. Society of Dyers and Colourists, England, 1990.

[9] *Indigo* obtenido en http://webexhibits.org/pigments/indiv/overview/indigo.html

[10]. Morrison R.T., Boyd R. N., Quimica Organica, quinta edición, Addison-wesley iberoamericana, U.S.A., 1990.

[11] Niemz M.H. Laser-tissue interactions. Berlin: Springer, 1996

[12] Shackelford James F., Ciencia de Materiales para ingenieros, tercera edición, Prentice Hall Hispanoamericana, Mexico, 1995

[13] Kiely Gerard, Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión, USA, McGraw-Hill.

[14] Ramalho R.S., Tratamiento de aguas residuales, Canadá, Editorial Reverte, 1995.

[15] Grigoryantis A. Basic of laser material processing. Moscow: MIR Publishers, 1994.

[16] Ready JF. Industrial applications of lasers. New York: Academic Press, 1997.

[17] Traian Dascalu, Sofia E. Acosta-Ortiz, Martin Ortiz-Morales, Isaac Compean. Removal of the indigo color by laser beam-denim interaction. Optics and Lasers in Engineering. 2000; 34; 179-189.

[18] Martín Ortiz-Morales, Marian Poterasu, Sofia E. Acosta-Ortiz, Isaac Compean, Ma. Rosa Hernandez-Alvarado. A comparison between characteristics of various laser-based denim fading processes. Optics and Lasers in Engineering. 2003; 39; 15-24.

[19] ATTCC Technical Manual, Volume 71, American Association of textile chemists and colorists, U.S.A. 1996

[20] Koechner W. Solid state laser engineering. London: Springer, 1996.

[21] *Laser Basics* obtenido en http://www.trotec.net/050+Downloads/_en-US/010+Laser+Basics.htm

[22] Siegman, A.E., An Introduction to Lasers and Masers, McGraw-Hill, USA, 1971.

[23] Macedo Claudia, *Destiñen mezclilla con bacterias* obtenido el 11 julio 2001 en www.reforma.com/ciencia/articulo/097338

INDICE DE FIGURAS:

2.1.	Espectro Electromagnético.	4
2.2.	Cálculo de la mancha del tamaño del láser a partir de la divergencia.	9
2.3.	Radiación Coherente.	9
2.4.	Disposición básica de un láser.	11
2.5.	Proceso de absorción y emisión espontánea.	13
2.6.	Proceso de absorción y emisión estimulada.	14
2.7.	Niveles de energía de los iones de cromio en el rubí.	16
2.8.	Elementos básicos de un láser de gas.	17
3.1.	Formula del color índigo.	51
4.1.	Fenómeno de vaporización.	64
4.2.	Fenómeno de Fotoablación.	64
4.3.	Sistema de grabado con láser	67
4.4.	Espectro de absorción de una solución de color índigo acuosa con una concentración de 0.001 g/mol.	68
4.5.	Espectro de Reflectividad difusa de muestras irradiadas con láser de Nd:YAG, λ= 532 nm.	69
4.6.	Espectro de reflectividad difusa para una muestra textil irradiada por el láser de Nd:YAG, λ= 1064 nm.	70
4.7.	Espectro de reflectividad difusa de una muestra irradiada por láser de Nd:YAG, λ= 1064 nm.	71
4.8.	Variación del espectro de reflectividad difusa con la fluencia láser; λ= 1064 nm.	72

4.9. Espectro de reflectividad difusa de una muestra textil irradiada con láser de CO_2, λ= 10.6 μm. 72

4.10. Espectros de reflectividad difusa para muestras irradiadas con tres longitudes de onda diferentes. 73

4.11. Resistencia a la tracción, tenacidad (N). 78

4.12. Resistencia a la tracción, elongación (%). 79

4.13. Resistencia al rasgado, fuerza (N). 80

4.14. Estabilidad dimensional de la trama, encogimiento (%). 81

4.15. Eficiencia del tratamiento superficial a la tela. 82

4.16. Análisis de aguas residuales. 84

5.1. Costos de producción. 88

5.2. Productividad diaria. 88

INDICE DE TABLAS:

2.1.	Longitudes de onda y frecuencias del Espectro Electromagnético	5
2.2.	Principales tipos de láseres y sus longitudes de Onda	6
2.3.	Principales longitudes de onda del He-Ne y niveles de potencia	18
2.4.	Diámetro y divergencia del haz de los diferentes tipos de láseres de CO_2	21
2.5.	Precios representativos de los láseres de CO_2	23
2.6.	Precios representativos para láseres de Argón	24
2.7.	Características principales de los huéspedes más utilizados para el Nd	27
2.8.	Características de algunos láseres Dye para diferentes fuentes de bombeo	32
2.9.	Clasificación de los láseres (EN60825)	43
2.10.	Daños a los ojos de las radiaciones	44
3.1.	Pasos en el proceso de desteñido de mezclilla tradicional	49
3.2.	Energías de dislocación de algunos enlaces químicos del índigo	51
3.3.	Parámetros de las aguas residuales	57
4.1.	Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises	75
4.2.	Evaluación de la Transferencia de color en la Escala de Grises	75
4.3.	Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises	75
4.4.	Evaluación de la Transferencia de Color en la Escala de Grises	76
4.5.	Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises	76
4.6.	Evaluación de la Transferencia de Color en la Escala de Grises	76
4.7.	Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises	77
4.8.	Evaluación del Cambio de Color en Escala de Grises	77
4.9.	Resistencia a la tracción	78
4.10.	Resistencia al rasgado	79

4.11. Estabilidad dimensional 80

4.12. Características del proceso de desteñido con láser de CO_2 81

4.13. Características del proceso de desteñido con láser de Nd:YAG 82

4.14. Resultados de análisis de aguas residuales 83

5.1. Estudio económico utilizando una maquina de sandblast. 86

5.2. Estudio económico utilizando la tecnología láser. 87