



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA  
DESING FOR SIX SIGMA (DFSS), EN LA FORMULACIÓN DEL PROCESO  
ABRASIVO ENZIMÁTICO REQUERIDO EN EL LAVADO INDUSTRIAL DE DENIM**

**Julio Fernando Estrada Hernández**

Asesorado por el MSc. Ing. Alfredo Víctor Hugo Ayerdi Díaz

Guatemala, febrero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA  
DESING FOR SIX SIGMA (DFSS), EN LA FORMULACIÓN DEL PROCESO  
ABRASIVO ENZIMÁTICO REQUERIDO EN EL LAVADO INDUSTRIAL DE DENIM**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JULIO FERNANDO ESTRADA HERNÁNDEZ**  
ASESORADO POR EL MSC. ING. ALFREDO VÍCTOR HUGO AYERDI DÍAZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Edgar Adolfo Reynoso Enríquez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA  
DESING FOR SIX SIGMA (DFSS), EN LA FORMULACIÓN DEL PROCESO  
ABRASIVO ENZIMÁTICO REQUERIDO EN EL LAVADO INDUSTRIAL DE DENIM**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 9 de octubre de 2014.



**Julio Fernando Estrada Hernández**



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala



**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
Teléfono 2418-9142 / 2418-8000 Ext. 86226

**AGS-MGIPP-0031-2014**

Guatemala, 09 de octubre de 2014.

Director  
Víctor Manuel Monzón  
Escuela de Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Julio Fernando Estrada Hernández** carné número **97-12317**, quien optó la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Gestión Industrial**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

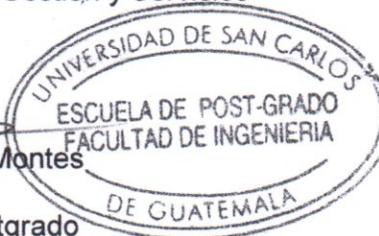
**Ing. Alfredo Ayerdi**  
Colegiado #8024

"Id y enseñad a todos"

MSc. Ing. Alfredo Víctor Hugo Ayerdi Díaz  
Asesor(a)

MSc. Ing. César Augusto Akú Castillo  
Coordinador de Área  
Gestión y Servicios

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes  
Directora  
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo  
/la



Ref.EIQ.TG.026.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería del estudiante, **JULIO FERNANDO ESTRADA HERNÁNDEZ**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en GESTIÓN INDUSTRIAL** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DESING FOR SIX SIGMA (DFSS), EN LA FORMULACIÓN DEL PROCESO ABRASIVO ENZIMÁTICO REQUERIDO EN EL LAVADO INDUSTRIAL DE DENIM"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2015

Cc: Archivo  
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala  
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DESING FOR SIX SIGMA (DFSS), EN LA FORMULACIÓN DEL PROCESO ABRASIVO ENZIMÁTICO REQUERIDO EN EL LAVADO INDUSTRIAL DE DENIM**, presentado por el estudiante universitario: **Julio Fernando Estrada Hernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, febrero de 2015

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Sea la gloria, que en su bendita gracia y misericordia me ha bendecido, guiándome, cual padre guía a sus hijos y quien en todo momento ha iluminado mi camino.
- Mis padres** Julio Cesar Estrada y Verónica Hernández; por su ejemplo de esfuerzo, sacrificio, perseverancia y entrega de amor, ya que en todo momento y sin darse cuenta han logrado hacer de mí lo que yo siempre soñé llegar a ser.
- Mis hermanos** Francisco, Vivian y Erick Estrada Hernández, con respeto y cariño, quienes incondicionalmente me han apoyado siempre, y han sido ejemplo en mi vida.
- Mis sobrinos** Jose Emilio Estrada y Juan Andrés Estrada Palomo, espero que sea de motivación para que luchen por sus metas personales.
- Mis abuelos** Jorge Hernández y Jesús de Hernández; Flora de Estrada (q.e.d.p.), porque siempre han sido ejemplo de amor, esfuerzo, unión y de humildad
- Mis familiares** A todos en general.

**Mis amigos**

Todos, con la admiración y respeto que se merecen.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Dios** Por el entorno que me ha brindado para realizarme como persona y como profesional.
- Mis padres** Por su apoyo, confianza, comprensión y amor que me han brindado en todo momento.
- Mis hermanos** Porque han sido ejemplo de esfuerzo, unión y de humildad.
- Ing. Alfredo Ayerdi y Marco Tejeda** Por su valiosa asesoría, en el desarrollo de este trabajo de graduación.
- Mis familiares** A todos en general, ya que todos ocupan un lugar muy especial en mi vida.
- Mis amigos** Muy en especial a: Josué Ramos, Diego Maldonado, Ramiro Prado, Werner Valiente, Carlos Morales, Hugo Gálvez, David Maldonado, Vivianne Ruíz, Patricia Orozco, Aury Ruano, Brian Luján, Gabriela Meza, Juan José Cuellar y Jorge Velásquez, por su ayuda incondicional y por hacer que cada momento vivido se convierta en un recuerdo perdurable en el tiempo.

**A todas aquellas  
personas que forman y  
fortalecen mi vida**

Muy en especial a los esposos Maldonado, por su ayuda para concretar este éxito y a Magrit Viera por su apoyo incondicional, por la confianza demostrada y por ser un ejemplo de superación personal y profesional.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTEDECENTES .....	7
2.1. Enzimas en la industria textil .....	12
2.2. Nuevas tendencias bio en la industria de los <i>jeans</i> .....	13
2.3. La aplicación de los principios de Six Sigma al diseño de productos y a sus procesos de soporte y manufactura .....	14
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3.1. ¿Cuál debería ser el incremento sostenible sobre los niveles de productividad y rentabilidad de una empresa manufacturera de <i>jeans</i> que opera en Guatemala, si logra la implementación de la metodología Desing For Six Sigma (DFSS) como herramienta de diseño en la formulación óptima de procesos abrasivos enzimáticos en el lavado industrial de denim?.....	19
4. OBJETIVOS .....	25
5. JUSTIFICACIÓN .....	27

6.	NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	33
7.	ALCANCES .....	39
8.	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	41
8.1.	Variables cuantitativas .....	41
8.2.	Indicadores asociados a las variables cuantitativas dependientes.....	42
9.	MARCO TEÓRICO .....	43
9.1.	Generalidades.....	43
9.2.	Proceso de lavado industrial de denim.....	48
9.3.	Desengomado.....	49
9.4.	Desengome enzimático.....	50
9.5.	Desengome oxidativo.....	50
9.6.	Abrasión “StoneWash” .....	51
9.6.1.	Abrasión mecánica (Olson L. A. 2005) .....	51
9.6.2.	Abrasión química o enzimática .....	52
9.6.3.	Abrasión combinada (mixta) .....	52
9.6.4.	Efecto de la temperatura .....	52
9.6.5.	Efecto del pH.....	53
9.7.	Desactivación.....	53
9.8.	Reducción .....	53
9.9.	Blanqueo.....	54
9.10.	Blanqueo con hipoclorito de sodio.....	54
9.11.	Blanqueo con permanganato de potasio .....	54
9.12.	Neutralizado .....	55
9.13.	Suavizado .....	55

9.14.	Factores de consideración en la calidad de la prenda confeccionada (Freeman 1995) .....	56
9.15.	Prevención de la contaminación (Freeman, 1995) .....	57
9.16.	Biotecnología. (Kirk R.E, 1962) .....	58
9.17.	Enzimas (Penet, CS 1991) .....	59
9.18.	Enzimas en la industria textil .....	59
9.18.1.	Alfa amilasa .....	60
9.19.	Celulasas .....	60
9.19.1.	Lacasa .....	61
9.20.	Desing For Six Sigma (DFSS) .....	62
9.21.	DFSS como un enfoque para diseñar .....	66
9.22.	Distinciones de DMAIC (Dennis, P. 2002) .....	67
9.23.	Similitudes con otros métodos .....	68
10.	PROPUESTA DE ÍNDICE .....	69
11.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	71
12.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	85
12.1.	Estadística descriptiva .....	85
12.2.	Gráficos descriptivos .....	86
12.3.	Estadística inferencial .....	86
12.4.	Diseño experimental .....	86
12.5.	Selección de muestreo estadístico .....	87
12.6.	Prueba de hipótesis .....	87
12.7.	Probabilidad .....	87
12.8.	Series de tiempo .....	87
13.	CRONOGRAMA .....	89

BIBLIOGRAFÍA ..... 93

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Esquema propuesto para la solución del problema identificado .....36

### TABLAS

- I. Cuantificación de la inversión.....90
- II. Recurso humano requerido .....91
- III. Recurso físico e insumos requeridos.....91



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>lb</b>	Libra
<b>“</b>	Pulgada
<b>“<sup>2</sup></b>	Pulgada cuadrada



## GLOSARIO

<b>Calidad Six Sigma</b>	Combinación de verificaciones de los requerimientos del cliente, reflejado en diseños robustos y en la capacidad de producir 3,4 defectos por millón de oportunidades de cometer un defecto.
<b>Capacidad del proceso</b>	La relativa habilidad de cualquier proceso para producir resultados consistentes, centrados sobre un valor deseado.
<b>Control estadístico de proceso</b>	Aplicación de métodos estadísticos y procedimientos relacionados a un proceso para normalizarlo.
<b>Correlación</b>	La determinación de un efecto o una variable, sobre otra situación dependiente.



## RESUMEN

Para dar una visión global de la investigación la misma se ha estructurado en capítulos los cuales siguen una estructura cuyo desarrollo integral permiten mejorar considerablemente el desarrollo y alcance propuesto para la investigación. En función a ello en el capítulo I se desarrollarán las generalidades del denim y destacará la evolución que la biotecnología (procesos enzimáticos) han logrado alcanzar en dicha industria, definidas las generalidades que rodean al proceso evaluado, la siguiente sección desarrollada es el capítulo II, en el cual se describirán de forma amplia y detallada cada una de las etapas que conforman una formulación típica para definir el proceso de lavado industrial de denim, es decir que en esta sección se detallarán los aspectos más relevantes de las etapas de desengome, abrasión, blanqueo, reducción y tintura que conforman la médula central de dicha formulación. Adicional a ello en este capítulo también se definen los principales factores que deben considerarse para establecer la calidad de un denim.

El capítulo III se desarrollará una visión más amplia de lo que es la biotecnología y definirá cuál ha sido el aporte de los procesos enzimáticos a la evolución de la industria textil del denim, es por ello que el enfoque de este capítulo es desarrollar el fundamento y principios biotecnológicos que fundamentan el uso de las diferentes enzimas (alfa amilasa, celulasa y lacassa) durante el proceso de lavado, lo que se pretende es establecer la naturaleza química de cada una de estas enzimas, para que en función a ello se pueda entender su finalidad de uso dentro las formulaciones del proceso de lavado.

Una vez que se han definido las generalidades del proceso de lavado industrial, el siguiente paso es definir el fundamento que apoya la implementación del DFSS como herramienta gerencial para mejorar sosteniblemente la productividad de una empresa fabril, para ello el capítulo IV se desarrollará de tal manera que el mismo defina la metodología e implementación del DFSS, pero a la vez también defina la correlación existente entre esta metodología y la metodología DMAIC y DMADV respectivamente.

En dicho capítulo también se desarrollarán las ventajas de implementar el DFSS como un enfoque para diseñar productos nuevos, ya que con dicha implementación se logrará obtener productos y servicios que proporcionan mejorar la propuesta de valor de las empresas, ya que su implementación genera satisfacción hacia los clientes y por lo tanto se obtiene un aumento considerable en la cuota de mercado. Por último, en este capítulo también se desarrollarán las similitudes y diferencias de la metodología DFSS con respecto a otras metodologías y con dicho desarrollo de información, se logrará justificar la selección de la metodología DFSS como herramienta gerencial, para incrementar la propuesta de valor por parte de la empresa hacia sus clientes, y también permitirá definir como esta propuesta se integra y fortalece la gestión del sistema de calidad de una empresa manufacturera de *jeans* con operaciones en Guatemala.

## 1. INTRODUCCIÓN

La globalización es un movimiento que sin duda alguna ha cambiado la perspectiva de la economía guatemalteca y el performance operativo de las empresas fabriles en los diferentes sectores productivos en los participan, esto debido a que a través de ella, se han logrado eliminar las fronteras físicas entre los países con los cuales Guatemala mantiene relaciones comerciales y por lo tanto, se ha incrementado la participación de las empresas guatemaltecas en los diferentes mercados, generándose con ello una necesidad inherente en la búsqueda del incremento de la competitividad por parte de cada una de estas empresas.

Un ejemplo claro de ello queda reflejado en el hecho de que la industria textil en Guatemala fue la industria que mayor generación de divisas logró alcanzar entre 2011 y 2013, con más de \$ 11 700 millones por año, desplazando así al café y el azúcar como productos exportables tradicionales del país; la industria textil y confección en Guatemala ha sido un eje económico central a nivel local, regional y nacional, hasta mediados de los años ochenta, el sector se encontraba orientado casi exclusivamente hacia la producción nacional y centroamericana, sin embargo, a partir de esa época el modelo de desarrollo cambió (de la sustitución de importaciones a la promoción de exportaciones), como resultado de los regímenes especiales para incentivar la exportación y de las propias tendencias y presiones del movimiento de la globalización.

Considerando lo anterior se tiene que en 2014 la industria textil guatemalteca se encuentra inmersa en un mundo cada vez más competitivo y

demandante, al punto que es considerada como uno de los grandes componentes del producto interno bruto (PIB) de Guatemala y por lo tanto una de las principales fuentes de trabajo en el país, superando los 92 mil empleos, que producen anualmente aproximadamente \$10 038 millones en telas y \$1 474 millones en prendas terminadas, lo anterior hace necesario para las empresas de este sector el estar actualizadas con herramientas tecnológicas y sistemas integrados de calidad, que den soporte al desarrollo integral de los diferentes procesos industriales que se ven involucrados en dicha industria, todo ello para estar a la vanguardia con empresas de categoría mundial incrementándose con ello la competitividad empresarial de nuestro país en este ramo de la industria.

Guatemala, en el caso de lavanderías industriales de denim, ha venido trabajando sostenible y sistemáticamente en los últimos 10 años en su actualización y para ello ha necesitado recurrir a los avances de la biotecnología, cuyos principios han revolucionado la industria al punto de convertirse en el pilar de la innovación ejecutada sobre denim y en función a ello se han generado diversas opciones sobre la apariencia visual (vintage) de la prenda, cada una de ellas determinadas mediante formulaciones cada vez más eficientes y rentables; lo anterior ha hecho que el proceso de lavado industrial sea más productivo y respetuoso del medio ambiente.

Esta es la principal razón por la que se ha diseñado la presente investigación, ya que la implementación del Desing For Six Sigma al proceso abrasivo enzimático, sugerida con el desarrollo de la misma, ayudará a mejorar la competitividad de la manufacturera de *jeans* más grande, definida así por su volumen de ventas, que opera en Guatemala y por lo tanto también se favorecerá la economía nacional, esto a consecuencia de que al mejorar su performance operativo, la empresa estará en condiciones de incrementar sus

actuales exportaciones (160 000 unidades/ semana), incrementándose con ello el tributo arancelario que el Gobierno perciba de dicho aumento en unidades exportadas.

En el 2014, la empresa Manufacturera en la cual se realizará la investigación, se enfrenta a la situación negativa que representa el hecho de que consistentemente durante los últimos 6 meses de su operación, ha sufrido una pérdida en ventas de \$50 000 semanales (promedio), esto debido que la falta de estandarización de las variables de proceso que influyen directamente durante la etapa de biopulido (abrasión enzimática) propio de un lavado industrial de *jeans* que busca crear un aspecto vintage sobre las prendas, ha generado que en la actualidad la empresa manufacturera de *bottom* denim no cuente con una herramienta con base experimental, como lo es la correlación matemática a escala industrial entre la pérdida de propiedades físicas (tensión y rasgado) de la fibra de algodón y estas variables, lo cual ha incrementado la frecuencia con la que se producen unidades no conformes en términos de parámetros físicos.

Lo anterior ha limitado el crecimiento de las exportaciones y es por ello que resulta de suma importancia que de diseño, se ejecute e implemente la presente investigación, la cual se caracteriza por tener un enfoque cuantitativo tipo exploratorio ya que permitirá predecir el comportamiento de las propiedades físicas de las prendas terminadas en función a las variables del proceso enzimático y a partir del análisis de dicha correlación se podrán definir los críticos del proceso los cuales mediante la implementación sistemática de la metodología DSFF.

Deberán ser considerados como criterios de diseño elementales para formular procesos enzimáticos más robustos desde la perspectiva de

manufactura, mejorando con el desempeño de las operaciones al reducirse el nivel de desperdicio o unidades rags así como también al disminuir el nivel de reproceso, lo cual equivale a un costo oculto al que la empresa se enfrenta y el cual afecta negativamente su rentabilidad proyectada.

Con la ejecución e implementación de la metodología DFSS sobre el proceso abrasivo enzimático, se podrá mejorar sosteniblemente el performance operativo de la empresa logrando con ello concretar grandes beneficios sobre la rentabilidad de la operación a corto plazo en aproximadamente \$50 000 semanales, esto debido a que la cantidad de unidades a comercializar se incrementarán sosteniblemente conforme la implementación de la metodología garantice que las condiciones de proceso podrán resguardar las propiedades físicas de las prendas (tensión y rasgado) incluso cuando las mismas han sido expuestas a un proceso enzimático caracterizado por tener un comportamiento definido bajo control estadístico. El diseño de investigación a realizar será de tipo experimental basado en un enfoque cuantitativo.

Para concretar la fase experimental de la investigación la cual tendrá un enfoque cuantitativo, se utilizará la herramienta de diseño de experimentos dada por el SPC, con la cual se definirán las diferentes iteraciones a realizar en función a las variables independientes del experimento. Una vez definidas las iteraciones se correrá la parte experimental con la ayuda de los técnicos del área de investigación y desarrollo; durante esta fase experimental se realizará un muestreo probabilístico y las unidades muestra serán enviadas al laboratorio donde siguiendo la metodología definidas con las Normas ASTM D5034 y ASTM D1424.

Para determinar las propiedades físicas de tensión y rasgado respectivamente en las prendas, se obtendrán los valores que permitirán definir

mediante una correlación matemática, cuál es el efecto que cada una de las variables produce sobre los parámetros físicos de la prenda y en función a ello se estará en la capacidad de definir de forma experimental cuales son las variables que deben ser consideradas como críticas, en la formulación del lavado para que la prenda final cumpla con los requisitos establecidos por el cliente. Una vez definidos los críticos, la metodología DFSS ayudará a generar sistemáticamente formulaciones robustas en términos de manufactura, lo que ayudará a mejorar el performance de la empresa y a la vez también impactará positivamente en la percepción del consumidor final del *jeans*, ya que tendrá acceso a un producto de alta moda (vintage) y máxima durabilidad.

Si lo anterior se contrasta contra el costo estimado del estudio de investigación (\$ 7 125) y se considera el apoyo incondicional de la Alta Dirección, el tiempo para realizar la fase experimental e implementación y el fácil acceso a la materia prima, entonces se puede aseverar sin ninguna duda que el estudio resulta ser factible.



## 2. ANTEDECENTES

La empresa en la cual se propone la implementación de la metodología DFSS, como herramienta para mejorar el diseño de las actuales formulaciones y para robustecer en términos de manufacturabilidad (reduciendo el riesgo en las formulaciones) el diseño de la etapa del proceso abrasivo enzimático al que es sometido un *jeans*, cuando sobre el mismo se requiere generar un aspecto vintage, es una manufacturera de capital estadounidense verticalmente integrada, que produce *jeans* de moda y que opera en ciudad de Guatemala; hasta enero del 2014 dicha empresa exporta 160 000 unidades semanales en la categoría fashion denim y dentro del sector de la industria textil (Apparel) del hemisferio occidental se ha logrado posicionar como el vehículo más rápido para introducir masivamente al mercado productos *bottom* denim innovadores - diferenciados y de alta moda, acorde a cada uno de los segmentos que atienden sus diferentes clientes (marcas propias).

La empresa ofrece soluciones en denim mediante la integración de sus operaciones es decir tal y como se expresa en su propuesta de valor ofrece servicios "desde el principio de la cadena productiva hasta la puesta del producto terminado en las bodegas de sus diferentes clientes", por lo que en su servicio se incluyen las siguientes etapas: cultivo algodón, manufactura de tela, diseño de colecciones *jeans* acorde a las diferentes temporadas, manufactura *jeans* y procesos logísticos. Sus capacidades especializadas de procesamiento en seco y en húmedo, así como el enfoque en la forma y detalles de construcción de la silueta de sus *jeans*, le generan a sus clientes (intermediarios/ marcas propias) una ventaja competitiva en este mercado caracterizado por el constante cambio y por la temporalidad de las modas.

La comprensión y captura de las tendencias así como sus diseños creativos propios le proporcionan a la empresa la posibilidad de manufacturar lo que requieren sus clientes al menor tiempo y costo posible; situación que les ha permitido fortalecer su propuesta de valor, la cual queda definida dentro de su política de innovación y servicio al cliente mediante los ítems siguientes, los cuales resumen la identidad y el giro de negocio de la empresa en cuestión:

- Creación de colecciones que respondan a las necesidades de los clientes y que refleja un profundo conocimiento del mercado, junto con la excelencia en la experiencia tecnológica.
- Coordinar el desarrollo de productos a partir de hilados de acabado de prendas de una manera que maximiza la innovación a precios competitivos.
- Crear y ofrecer producto aumentado (producto + servicio) adecuado al precio adecuado para cada cliente de su cartera.
- Preselección de la oferta y ayudar a los clientes mercancía de sus líneas en la toma de decisiones que implica atributos físicos y visuales de las prendas.

Manufacturar productos innovadores y diferenciados ha implicado que la empresa haya desarrollado creativa y sosteniblemente un área de investigación y desarrollo, la cual se ha apoyado de nuevas herramientas tecnológicas como lo es la biotecnología y a partir de ello ha logrado adaptar continuamente técnicas de abrasión o biopulido (procesos enzimáticos) durante la etapa de lavado industrial del denim, esto con la finalidad de poder ofrecer al menor

tiempo posible productos diferenciados con apariencia *vintage*, caracterizados por desgastes localizados en ciertas áreas de las prendas.

La búsqueda de dicha diferenciación sobre el producto ha llevado a la empresa a enfrentar un nuevo reto, el cual es de que los *bottom* denim que comercializan deben cumplir tanto con las especificaciones visuales (*fashion vintage*), así como también deben cumplir con los parámetros de calidad definidos en función a tensión y rasgado, lo cual se hace previamente para cada cliente en particular; es por ello que las formulaciones de lavado cada día son más susceptibles a los avances de la biotecnología para crear dichos acabados, que a la larga son los diferenciadores del producto que esta empresa comercializa. Para apoyar científicamente lo anterior se han realizado las siguientes investigaciones e hipótesis, las cuales sirven de plataforma para sustentar los resultados planteados a lo largo de esta investigación y las mismas son:

Jadel Romain Lam (2005), estudió el efecto de la enzima Lacassa en la reducción del índigo durante el lavado industrial de pantalones de lona y estableció que: “en la industria textil se aplica tecnología biológica para modificar la apariencia final de los *jeans*. Lo cual se debe a que el gastado o envejecimiento ya no se fabrica mediante un prelavado con piedras sino con productos biológicos o "*biostoning*". Habitualmente se conoce como *stonewashed* a los *jeans* de aspecto gastado, un estilo que se logra a través de un prelavado con piedras que ablandan y destiñen el tejido y le dan un acabado moderno y confortable. Pero este proceso presenta desventajas para la calidad y la producción de la ropa.” (Lam Jadel 2005, p. 14).

En el 2014, para conseguir el mismo diseño sobre las prendas, se aplica el método de biostoning o abrasión enzimática, la cual emplea durante la etapa de abrasión productos enzimáticos obtenidos por biotecnología en lugar de abrasivos como piedras pomex o derivados de ella. Este se considera un método de abrasión suave, económico y ecológico para una vestimenta que revolucionó la moda y para un negocio textil millonario. La moda “bio” es parte de las nuevas tendencias en los *jeans* cuya apariencia es conocida en el mercado como *vintage look* y su empleo se ha generalizado a tal punto que es común que un lavado industrial de denim incluya en su formulación uno o dos pasos abrasivos, en los cuales es común que se recurra a una combinación de abrasión mecánica (piedra pómez y sus derivados) y productos enzimáticos (biotecnología) en el mismo baño, lo cual se debe a que la combinación de ambos métodos permite crear una apariencia mucho más auténtica para el acabado final que se busca, el cual es de un auténtico *jeans vintage*.

Ronald Mendez (1999), con el desarrollo del estudio comparativo de la aplicación de celulosas ácida y neutra, en el paso de abrasión de un proceso de lavado industrial sintetiza los avances del uso de enzimas en el lavado industrial de *jeans* de la siguiente manera y establece que el tratamiento enzimático de prelavado de los *jeans*, es un método que comenzó a utilizarse en la década de 1980 con el objetivo de modernizar la estética de la prenda.

De esta forma Ronald Mendez (1999) mediante su estudio comparativo define la etapa de *stonewash*, o lavado con piedras, como el proceso mecánico de sumergir el tejido denim recién teñido en lavadoras industriales donde se agita junto con pequeñas piedras pómez. Al girar el tambor de la lavadora se produce una fricción entre la piedra y la tela que provoca el desprendimiento de partículas de tintura y parte de la fibra de la superficie de la prenda, obteniendo así el efecto deseado.

Sin embargo, el uso de piedras pómez presenta varios inconvenientes. En primer lugar, la abrasión causada por las piedras es difícil de controlar ya que si se colocan pocas piedras expresado como porcentaje de peso, no se logra la estética buscada, y si se colocan muchas piedras con el porcentaje de peso, se daña la tela. (Mendez, R. 1999); lo anterior experimentalmente esto se conoce en la industria textil del denim como falta o exceso de contraste, el cual no es más que la relación de puntos abrasivos definidos en un cierto tamaño de tela.

Por lo tanto, el resultado del proceso abrasivo mecánico no es uniforme y un porcentaje de las prendas tiende a sufrir danos físicos por el exceso de abrasión. Además de ello la experiencia demuestra que el proceso de gastado mecánico con piedra pómez no es selectivo con lo cual no solo corroe la tela sino también daña los botones, los zippers y el tambor de la lavadora. (Jadel Romain Lam 2005). Lo descrito anteriormente repercute negativamente sobre la calidad de los productos y sobre la vida útil del equipamiento, situación que aumenta los costos de producción y si a esto se suma el problema de contaminación ambiental por los residuos industriales, entre ellos el polvo de la piedra pómez y los restos de la fibra del tejido, entonces se puede delimitar que dicha etapa del proceso industrial de denim, se ha visto en la necesidad de experimentar cambios significativos al punto que se ha tenido que migrar hacia procesos enzimáticos, como herramienta para minimizar los danos ocasionados por el abrasivo y a la vez lograr alcanzar los tan variados aspectos finales que los clientes requieren en las prendas terminadas. (Mendez, R. 1999, p. 14)

Gustavo Antonio Hurtarte (1999) en su estudio *Condiciones óptimas para la aplicación de enzimas en los procesos de lavado y acabados especiales en la industria textil* define la siguiente terminología:

## 2.1. Enzimas en la industria textil

La solución a los problemas que genera el prelavado con piedras vino de la mano de la biotecnología, mediante el proceso conocido como *biostoning* o lavado biológico con el empleo de enzimas. “Uno de los objetivos de los tratamientos textiles modernos es obtener el efecto deseado en las fibras, utilizando procesos que conlleven el mínimo impacto ambiental. Dentro de este contexto, se comenzaron a utilizar diversos procesos biotecnológicos, mediante el empleo de enzimas”. (Hurtarte, G., 1999, p. 51).

Las enzimas son sustancias que provienen de los seres vivos donde cumplen la función de catalizadores biológicos, es decir que aceleran procesos vitales. Además, son biodegradables con lo cual cumplen con el requisito de ser "amigables" con el medioambiente. Hoy en día las enzimas son parte de los procesos industriales y de las actividades domésticas. Por ejemplo, al lavar la ropa, las enzimas son las que hacen el trabajo de sacar las manchas ya que el detergente en polvo tiene enzimas que remueven selectivamente las manchas. (Hurtarte, G., 1999. p. 59).

(Boyce Charles, 2001) en tratado *Novo's handbook of practical biotechnology*, establece que en la industria textil, el suavizado de las telas y el “gastado” de los *jeans* también se realizan mediante el empleo de enzimas. “El aumento en el uso de enzimas para el tratamiento de textiles da la oportunidad de sustituir el procesamiento tradicional, ecológicamente hostil con métodos que ahorran agua y energía, combinado con un menor impacto ambiental”.

Lo anterior se complementa con lo detallado en el documento generado con el Symposium de la AATC (2001): *Value added innovations in garment wet*

*processing technology, Symposium*, en el que se genera la siguiente perspectiva sobre la biotecnología y su desarrollo en la industria textil de denim.

## **2.2. Nuevas tendencias bio en la industria de los *jeans***

El biostoning es una técnica que fue introducida en Europa en 1989, y se extendió rápidamente por el mundo. Consiste en el empleo de enzimas capaces de destruir levemente la superficie de la tela hasta ablandarla. Estas enzimas reciben el nombre de celulasas porque digieren específicamente la celulosa, el principal componente de la fibra de algodón. Las celulasas son producidas por hongos microscópicos, de donde se extraen para su utilización. Cuando se emplean celulasas en lugar de piedras el proceso se puede controlar con más precisión. Hoy casi todos los *jeans* se tratan usando celulasas de microorganismos modificados genéticamente ya que resulta más económico y beneficioso para el medioambiente, y mejora significativamente la calidad del producto final. Según detalla Santi Garcia-Vallvé 2001, profesor del Departamento de Bioquímica y Biotecnología de la Universidad Rovira y Virgilio en Tarragona, España, “Las principales ventajas del “biostoning” son:

- Incremento de productividad en un 30-50 % (poca cantidad de enzima en vez de kilos de piedra pómez).
- Ausencia de polvos tóxicos.
- Creación de amplia gama de tonos y efectos de acabado.
- Reducción de daños en las telas y menor desgaste de las máquinas de trabajo.
- Reutilización de las enzimas.”

En cuanto a la implementación de la Metodología Design For Six Sigma (DFSS), Enrique Zamora, 2002, detalla en su tesis de magister: *Análisis de la metodología de diseños para seis sigma para la mejora de calidad mediante la creación de diseños robustos de productos en el área de ingeniería y su impacto en la reducción de costos*, que el DFSS (características e implementación) se define como:

### **2.3. La aplicación de los principios de Six Sigma al diseño de productos y a sus procesos de soporte y manufactura**

Mientras Six Sigma por definición se centra en la producción de fases para un producto. DFSS se basa en la investigación, diseño y desarrollo de las fases. DFSS combina muchas de las herramientas utilizadas para mejorar productos o servicios existentes e integra la voz del cliente en la simulación de métodos para predecir nuevos procesos y rendimiento del producto.

Las fases o pasos precisos de la metodología DFSS no son universalmente definidas. La mayor parte de las organizaciones implementarán DFSS para convenir a su negocio, industria y cultura. La metodología DFSS, en vez de la metodología DMAIC, debería ser utilizada cuando:

- Un producto o proceso no existe en su compañía y necesita ser desarrollado.
- El producto o proceso existe y ha sido optimizado (utilizando DMAIC o no) y aún no cumple con el nivel de especificaciones del cliente o de Six Sigma. (Zamora, Enrique 2002)

El DFSS es una forma de implementar la metodología Six Sigma tan pronto como sea posible en el producto o el ciclo de vida del servicio. Es una estrategia hacia la extraordinaria ROI para diseñar las necesidades requeridas por el cliente y la habilidad del proceso. DFSS puede producir el mismo orden de magnitud que DMAIC en los beneficios financieros. Pero también ayuda enormemente a una compañía a innovar, exceder las expectativas del cliente, y convirtiéndose en el líder del mercado. (Zamora, Enrique 2002, p. 23)

DFSS es el acercamiento de Six Sigma para el diseño de productos concretamente, diseñando productos que son resistentes a la variación en los procesos de manufactura. Usar DFSS significa diseñar calidad en el producto desde su inicio. Se están previniendo variaciones con pérdidas antes de que estas sucedan, y por tanto siendo capaz de identificar y corregir los problemas tempranamente cuando los costes para su solución son menores. Una implementación exitosa de DFSS requiere los mismos ingredientes que cualquier otro proyecto Six Sigma: un compromiso significativo y un liderazgo desde la cumbre, una planificación que identifique y establezca objetivos de programa medibles así como una línea temporal, y un entrenamiento más la participación de toda la plantilla. (Enrique Zamora, 2002, p. 25)

Planear para DFSS requiere recopilar la información necesaria que permitirá una producción libre de errores o productos y procesos libres de defectos que satisfagan la rentabilidad del cliente. DFSS intenta predecir el comportamiento de los diseños bajo consideración y corregirlos para así producir una variación antes de que el problema suceda. Esto significa entender las necesidades reales de sus clientes y traducir esas necesidades en características técnicas vitales del producto y a la larga en características críticas en lo referente a la calidad (CTQ) del producto y su proceso.

Se puede entonces utilizar el diseño de experimentos (DOE) para desarrollar un diseño robusto que optimice la eficiencia y reduzca los defectos. Las válidas y fiables métricas para vigilar el progreso del proyecto se establecen prontamente en el proyecto, durante la fase “Medir” utilizando DMADV. Las aportaciones clave son priorizadas para establecer una lista corta para estudiar con más detalle.

Con una lista priorizada de aportes a mano, el equipo de DFSS determinará las formas potenciales en que el proceso puede fallar y tomar acciones preventivas para mitigar o prevenir esos fallos. A través de los análisis, el equipo DFSS puede determinar las causas del problema que necesita mejoras y cómo eliminar la zanja existente entre el rendimiento real y el nivel de rendimiento deseado. Esto supone descubrir por qué los defectos son generados mediante identificar las variables clave que más probablemente creen variaciones en el proceso. El Modo de Fallo y Análisis de Efectos (FMEA) y la Determinación Anticipada de Fallos (AFD) pueden ser utilizados tanto para el diseño del producto como el diseño del proceso. (Zamora, E. 2002, p. 28).

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de estandarización de las variables: temperatura, porcentaje (%) en peso de enzima celulasa y el tiempo de proceso que influyen directamente durante la etapa del proceso de biopulido (abrasión enzimática) propio de un lavado industrial de *jeans*, ha generado que la empresa manufacturera de *bottom* denim no cuente con una herramienta experimental, como lo es la correlación matemática a escala industrial entre la pérdida de propiedades físicas (tensión y rasgado) de la fibra de algodón y estas variables, lo cual ha incrementado la probabilidad de producir unidades no conformes en términos de parámetros físicos (tensión y rasgado) con respecto al requerimiento del cliente y por lo tanto se ha reducido significativamente la productividad de la empresa en la cual se realizara el presente experimento.

Lo anterior ha limitado el crecimiento de las exportaciones de Guatemala, ya que esto se ha traducido en pérdida en ventas para la industria textil del país, al operar en la zona 7 de la ciudad capital con esta limitante sobre su productividad, una empresa textil de capital norteamericano dedicada a la manufactura de *jeans* de moda para marcas altamente reconocidas a nivel mundial, esta empresa se ha caracterizado por la búsqueda sistematizada y constante de la mejora continua de sus procesos productivos con el afán de explotar su ventaja competitiva enfocada en la Innovación de sus productos en el mercado principalmente en el mercado norteamericano, lo cual le ha valido para mantener el liderazgo de la categoría de denim en el hemisferio occidental.

Como parte de esta mejora, la empresa se ha apoyado de los avances de la biotecnología para optimizar el performance del lavado industrial en cuanto a: reducir los tiempos del proceso abrasivo, eliminar los tiempos muertos del equipo, reducir el impacto ambiental y mejorar la apariencia vintage sobre las prendas; aunque es preciso aclarar que el reto acá está en el hecho de todo ello debe concretarse mediante una formulación cuyo efecto negativo sobre las propiedades físicas (tensión y rasgado) sea el mínimo posible, principalmente en telas cuya composición es 98 % algodón y 2 % spandex la cual es la característica principal de tela que más se comercializa en la actualidad sin distinción entre segmento de hombres o mujeres.

Si bien es cierto que la empresa ha logrado implementar los avances de la biotecnología como factor diferenciador en la formulación de lavado de sus diseños propios, en el 2014 se ve ante la problemática de que continuamente se están produciendo a escala industrial *batch* de lavado cuyas unidades no cumplen con las especificaciones del cliente en cuanto a parámetros de tensión y rasgado (calidad de la prenda), lo cual se debe a la falta de estandarización de las variables: porcentaje en peso de aplicación de la enzima, temperatura de operación y tiempo de proceso, sobre las que se fundamenta el resultado del proceso de abrasión enzimático (biopulido).

La falta de estandarización de la variables que rigen el proceso abrasivo enzimático y el desconocer como dichas variables influyen sobre la calidad de la prenda terminada ha llegado a tal escala, que la empresa que en el primer bimestre del 2014 produce 160 000 unidades a la semana, ha visto reducido consistentemente este volumen de exportaciones durante los últimos 14 meses, ya que se están generando en promedio 0,015 % de unidades no conformes (Unidades Rags) a la semana por la falta de estandarización de esta etapa del

proceso de lavado industrial, lo cual equivale a 2 400 unidades a la semana (aproximadamente \$ 50 000 esto considerando los diferentes precio de venta).

Esta pérdida en ventas está fundamentada en el hecho que la prenda que no cumpla con la especificación de tensión y rasgado no puede ser comercializada en el mercado , ya que si esto sucede se corre un alto riesgo de crear insatisfacción en el cliente final (usuarios) lo que impactaría negativamente en las ventas del resto de estilos de la categoría y por lo tanto se reduciría la participación en el mercado del cliente intermediario (marcas propias), en función a lo anterior resulta evidente que el estudio se desarrollará con el objetivo primordial de responder a la Interrogante principal, definida como:

**3.1. ¿Cuál debería ser el incremento sostenible sobre los niveles de productividad y rentabilidad de una empresa manufacturera de jeans que opera en Guatemala, si logra la implementación de la metodología Desing For Six Sigma (DFSS) como herramienta de diseño en la formulación óptima de procesos abrasivos enzimáticos en el lavado industrial de denim?**

Para ello resulta indispensable definir cómo incide cada una de las variables que deben considerarse durante el proceso abrasivo enzimático: temperatura proceso, porcentaje en peso de enzima, y tiempo; sobre la calidad de la prenda evaluada en términos de tensión y rasgado definido según la Norma ASTM D5034 y D1424 respectivamente, ya que a través de dichas correlaciones se podrán definir los críticos por etapa del proceso lo cual es un requisito básico para establecer cuáles son los requerimientos necesarios para ejecutar la implementación de la metodología DFSS.

En función a dicha implementación se podrán diseñar procesos abrasivos enzimáticos más robusto en términos de manufacturabilidad, que le garanticen la satisfacción tanto de los accionistas de la empresa, ya que los resultados a obtener permitirán mejorar el performance y la eficiencia operativa del área de lavado, así como también permitirá incrementar la satisfacción del cliente final ya que este podrá obtener un *jeans* cuya apariencia se ha modificado para tener un aspecto *vintage*, sin sacrificar el rendimiento que pueda ofrecer la prenda, definida en términos de durabilidad .

Para complementar el planteamiento del problema expuesto con la pregunta principal, se plantean paralelamente las siguientes 4 preguntas auxiliares, cuya resolución propondrá un esquema de solución sistemático hacia la no conformidad que enfrenta en el 2014 la empresa, estas preguntas son:

1. ¿Cuáles deben ser las variables que la metodología DFSS debe de considerar como críticas durante la etapa de diseño para la formulación óptima del lavado industrial de denim que incluya un proceso de bio-pulido (abrasión enzimática) como herramienta bioquímica para crear un aspecto vintage sobre la fibra de algodón?
2. ¿Cómo se determina la calidad de la prenda asociada a la satisfacción del cliente, en función a las propiedades físicas de resistencia a la tensión y al rasgado así como la pérdida de peso que sufre la fibra de algodón durante el proceso lavado industrial de denim, definidas mediante las pruebas de laboratorio ASTM D5034 y ASTM D1424 respectivamente?
3. ¿Cuál es la correlación matemática que describe el comportamiento existente entre los parámetros de calidad de la prenda (resistencia a la

tensión y rasgado) y cada una de las variables que la metodología DFSS debe considerar como críticas para la formulación óptima del proceso abrasivo enzimático durante el lavado industrial de denim?

4. ¿Cuál debería ser el incremento sosteniblemente sobre los niveles de facturación semanal de una empresa manufacturera de *jeans*, si se reduce en un 80 % (con respecto al último trimestre del año anterior, 2013) el volumen de unidades no comercializadas por no cumplir con las especificaciones de calidad en la prenda en función a las variables cuantitativas de resistencia a la tensión y al rasgado?

El estudio se realizará en las instalaciones físicas de empresa Manufacturera de *jeans*, la cual se encuentra ubicada en la zona 7 de la ciudad capital de Guatemala y para llevar a cabo la fase experimental, primero se diseñará el experimento en función a las variables independientes y luego se ejecutará una corrida a nivel laboratorio en máquinas de muestras (10 kg) en la cual se definirán los parámetros de operación necesarios para proceder a formular y validar la correlación de la variables en una máquina en ambiente producción con capacidad de 125 kg (prenda seca). El tiempo estimado para completar el análisis es de aproximadamente 15 meses y para ello se tendrá el apoyo de la alta gerencia y del personal operativo técnico del área de investigación y desarrollo de dicha planta así como del área del laboratorio textil.

En términos de viabilidad del estudio, para concretar la parte experimental se hará uso del recurso de la empresa en cuanto a materiales (tela e insumos para lavado), equipo de lavado industrial y equipo de laboratorio, se ha planificado que las diferentes pruebas se corran a escala laboratorio y posterior a ello se ejecuten las pruebas en ambiente producción, manipulándose para ello

las variables de pH del baño, temperatura y tiempo de proceso; lo anterior implica que la supervisión en cada uno de los experimentos será clave para validar que los cambios proyectados en estas variables se ejecuten a cabalidad. Es por ello que se ha establecido en conjunto con la Alta Gerencia de la empresa que las diferentes iteraciones que se consideren en la fase experimental solo se podrán ejecutar de lunes a viernes en horarios de 07:00 am a 18:00 horas, ya que ello permitirá validar los resultados que se obtengan experimentalmente, en función a ello se estima que la parte experimental estará completada en 8 meses calendario, a partir del momento en que se tenga acceso a la materia prima.

Si a lo anterior se le adiciona el tiempo necesario para fundamentar el estudio y para extraer las conclusiones que puedan generarse de la interpretación de los resultados, se estima que el tiempo total será de aproximadamente 15 meses (abril 2013 – julio 2014). En función a la anterior desde ya se define como accesible a mediano plazo la consecución del estudio y se ven a grandes rasgos los aportes y beneficios que el mismo puede generar en la categoría de denim en la industria textil al reducirse las unidades no concretadas por no cumplir con la especificación de tensión y rasgado, lo cual representa una pérdida en ventas semanal de \$ 50 000,00.

La principal limitante proyectada será la disponibilidad en horarios del: Equipo industrial (lavadora y equipo de laboratorio), para la consecución y análisis de la fase experimental. Adicional a ello por tratarse de una determinación experimental y un efecto enzimático, los resultados del experimento dejarán de tener validez experimental en el momento en que se cambian las condiciones de operación (tiempo, temperatura y pH) o bien cambie la materia prima (tela) y/o los insumos (enzima celulasa, ácido acético) sobre los que se fundamentaran los resultados del experimento.

Adicional a ello hay que considerar que durante la etapa experimental, solo se empleará como insumo abrasivo la enzima celulasa que en el 2014 se emplea en ambiente de producción en la empresa textil en la que se efectuará el análisis, es decir que no existirá comparación contra resultados obtenidos contra otras enzimas celulasas; además hay que considerar también que el experimentó se limitará a los resultados obtenidos de un proceso abrasivo enzimático eliminando con ello el efecto de las variables que podrían obtenerse al incluir abrasivos mecánicos (piedra pómez, arena, etc.) como agentes abrasivos durante la etapa de abrasión forzada en el lavado industrial del denim.



## 4. OBJETIVOS

### General

Incrementar sosteniblemente los niveles productividad y rentabilidad de una empresa manufacturera de *jeans* que opera en Guatemala al implementar la metodología Desing For Six Sigma (DFSS), como herramienta de diseño en la formulación de procesos abrasivos enzimáticos durante el lavado industrial de denim.

### Específicos

- Describir las variables que la metodología DFSS debe considerar como críticas durante la etapa de diseño en la formulación del lavado industrial de denim que incluya un proceso de biopulido (abrasión enzimática) como herramienta bioquímica para crear un aspecto vintage sobre la fibra de algodón.
- Determinar la calidad de la prenda, en función a las propiedades físicas de resistencia a la tensión y al rasgado así como la pérdida de peso que sufre el denim durante el proceso lavado industrial, definidas mediante las pruebas de laboratorio ASTM D5034 y ASTM D1424 respectivamente.
- Establecer la correlación matemática existente entre los parámetros de calidad de la prenda (resistencia a la tensión y rasgado) y cada una de las variables que la metodología DFSS considera como críticas para la

formulación del proceso abrasivo enzimático durante el lavado industrial de denim.

- Incrementar sosteniblemente los niveles de facturación semanal de una empresa manufacturera de *jeans*, al reducir en un 80 % (con respecto al último trimestre del 2013) el volumen de unidades no comercializadas por no cumplir con las especificaciones de calidad en la prenda en función a las variables cuantitativas de resistencia a la tensión y al rasgado.

## 5. JUSTIFICACIÓN

El estudio a realizar seguirá una línea de investigación definida bajo 2 perspectivas: productividad y calidad y la importancia del diseño de este estudio, radica en el hecho de que la globalización y los tratados comerciales le han permitido a la industria textil (Apparel) guatemalteca, estar inmersa en un mundo cada vez más competitivo y demandante; lo cual ha generado que las empresas del sector textil desarrollen de forma continua estrategias dinámicas que les permitan estar actualizadas con herramientas tecnológicas de alto nivel y que a la vez den soporte al desarrollo integral de los diferentes procesos industriales sobre los que se fundamenta su manufactura, todo ello para competir contra empresas de categoría mundial.

Guatemala, en el caso de las lavanderías industriales de denim, viene trabajando sistemáticamente y sosteniblemente en su actualización y para ello ha necesitado recurrir a los avances de la biotecnología, cuyos productos han revolucionado la industria del denim al ser estandarte y generar opciones viables y económicamente atractivas, que hacen el proceso de lavado más productivo y respetuoso del medio ambiente, logrando obtener con las diferentes formulaciones de lavado, *jeans* de moda con una aspecto visual vintage cada vez más natural.

Como parte de la innovación en el área textil de denim, hace aproximadamente 5 años atrás, la tela, la cual es la principal materia prima empleada para la fabricación de un *jeans*, cambió de una composición 100 % algodón a una composición 98 % algodón y 2 % spandex, con lo cual se busca generar un mayor confort de la prenda al momento de ser utilizada y si a este

cambio se le añade el factor de la moda, la cual se caracteriza por reflejar un aspecto vintage (envejecido) natural, se tiene una situación muy complicada para los productores de *jeans* ya que es preciso encontrar la correlación óptima de las variables del proceso abrasivo enzimático que les permita ofrecer productos de alta moda (apariencia vintage) pero que a la vez resguarden los requerimientos sobre propiedades físicas (tensión y rasgado) establecidas por cada uno de los clientes intermediarios (marcas propias)

En función a lo anterior, se tiene que la necesidad del desarrollo de este estudio, se debe a que en el 2014 en ciudad de Guatemala opera una empresa manufacturera de *jeans* que produce semanalmente para exportación 160 000 unidades, de los cuales el 95 % puede catalogarse como productos de alta moda (fashion denim) y de este porcentaje un 80 % del total de unidades producidas son comercializadas bajo la categoría fashion - vintage denim y con el objetivo de que este estudio se convierta en una herramienta gerencial que permita fortalecer la propuesta de valor de la empresa al desarrollar sistemáticamente productos, servicios y procesos que sean más eficientes, rentables y que a la vez logren satisfacer las expectativas de los clientes.

Es por ello que se ha decidió emplear la metodología y herramientas de Design For Six Sigma como pilar fundamental a adoptar en la fase de desarrollo de un nuevo producto denim y en el diseño de las rutas de proceso que permiten conceptualizar la creatividad del área de diseño sobre una prenda denim ya que esta metodología se enfoca en la creación de valor mediante las aportaciones de los clientes, los proveedores y las necesidades de la empresa mientras que el tradicional Six Sigma tan solo se enfoca en la mejora y no en el diseño del producto así como también el diseño probabilístico y el diseño de calidad no permiten conceptualizar una solución integral que satisfaga simultáneamente tanto a las necesidades de los clientes como a los accionistas.

El porcentaje de unidades comercializadas bajo la categoría fashion-denim (80 % del total de producción), define la inherente necesidad que la empresa sostiene de establecer experimentalmente bajo la líneas de investigación de productividad y calidad, como es que se correlaciona la pérdida de propiedades físicas (tensión y rasgado) y variaciones sobre el peso de la tela por pulgada cuadrada con respecto a las variables que participan en el tratamiento con enzimas celulasas requerido durante la etapa de abrasión enzimática del proceso de lavado industrial; esto debido a que al momento de definir esta correlación estaremos en la capacidad de mejorar el performance operativo de la empresa al incrementar la satisfacción del cliente final y de los accionistas, ya que del total de unidades producidas en una semana , existe aproximadamente un 0,015 % de unidades que no pueden comercializarse por no cumplir con la especificación del cliente en lo que se refiera a la calidad de la prenda (tensión y rasgado). Es decir que la empresa pierde el costo de oportunidad de comercializar 2 500 unidades semanales, equivalente aproximadamente a \$ 50 000,00.

La motivación personal para concretar este estudio es el hecho de que una vez definida la correlación entre la perdida de resistencia (tensión y rasgado) y las variables independientes que rigen el paso de abrasión enzimática, la empresa y las diferentes lavanderías industriales enfocadas en la elaboración de *jeans*, contarán con una herramienta científica que fundamentada sobre aspectos fisicoquímicos permitirá determinar desde la etapa de desarrollo, cuál debe ser la formulación óptima para esta etapa de proceso y en función a ello poder predecir con exactitud cuál debe ser la pérdida en cuanto a resistencia que la prenda debe sufrir por tipo de lavado. Esta situación les permitirá mejorar la productividad del proceso y por lo tanto la competitividad de la industria textil de denim al mejorar la rentabilidad de su

operación sin afectar la adaptación de los procesos en busca de los requerimientos del mercado.

El principal beneficio que obtendrá la empresa al implementar el DFSS en el proceso abrasivo enzimático, será el de incrementar su competitividad, la cual estará definida en función a su capacidad de perfeccionar el enfoque de su administración hacia: la introducción productos nuevos (NPI) y el manufacturar eficientemente productos innovadores en términos de biotecnología (procesos enzimáticos) y que al vez cumplan con especificaciones de calidad (resistencia a la tensión y rasgado) para el producto terminado; dicho beneficio se convertirá sin duda alguna en una de las principales fortalezas para la empresa y podrá ser utilizado como herramienta de venta por parte del área comercial ante los clientes actuales y potenciales; esto le servirá a la empresa para incrementar el actual nivel de sus ventas, generando con ello un aporte sostenible para la economía nacional, ya que ello servirá para garantizar la operación sostenible de la empresa en el país y con ello resguardar el empleo de cada uno de sus colaboradores los cuales a la fecha suman 4 500 empleados directos.

Lo descrito con anterioridad fundamenta la principal razón por la cual se seleccionó al DFSS como herramienta gerencial para incrementar la competitividad de la empresa, ya que dicha metodología surge como el complemento ideal para lograr reducir la variación generada por el proceso enzimático desde los orígenes del diseño de la etapa abrasiva del proceso industrial de denim, es decir que el esfuerzo del DFSS se centrará en la prevención de defectos o condiciones no aceptables para el proceso abrasivo enzimático y adicional a ello también se enfocará en la solución de problemas relacionados, tanto con la apariencia de la prenda como también con los parámetros físicos que definen la calidad del producto terminado (parámetros de resistencia a la tensión y rasgado), los cuales son establecidos como

requisitos comerciales por los diferentes clientes. Con la implementación del DFSS se pretende identificar las características que el cliente considera críticas en el producto denim terminado y una vez se tengan claramente identificadas estas características será necesario correlacionarla con la etapa de abrasión propia del diseño, para la formulación de un lavado industrial de denim que busca generar una apariencia vintage sobre la prenda.

Con toda esta información el desarrollador del producto se podrá enfocar en las características críticas de diseño para la etapa abrasiva del lavado industrial, que tienen un impacto directo sobre el cliente final ya que esta etapa les permite satisfacer las necesidades del cliente tanto sobre la apariencia de la prenda así como también sobre la funcionalidad y durabilidad de la misma.

Adicional a lo anterior, la implementación del DFSS además de incrementar la competitividad de la empresa definida en términos de reproducibilidad y manufacturabilidad, también permitirá mejorar la eficiencia y eficacia operativa de la empresa en el mercado textil de denim, ya que esta metodología le permitirá al área de investigación y desarrollo realizar diseños robustos exitosos para nuevos productos, lo cual implicara realizar la capacitación del personal técnico - operativo en el diseño de rutas y formulaciones de proceso que incluyan parámetros / variables críticas y definición de tolerancias para cualquier formulación del proceso abrasivo en el que se esté trabajando, generándose con ello una reducción del desperdicio el cual puede ser tanto de tiempo, como de materia prima y recurso humano empleado para realizar la operación de lavado.

También es necesario el considerar que uno de los beneficios adicionales que se esperan obtener con la implementación de la metodología DFSS para el área de manufactura, será el garantizar sistemáticamente que las modificaciones o los nuevos diseños cumplirán con las especificaciones de resistencia a la tensión y al rasgado (calidad de la prenda) definidas por el cliente como parámetros de aceptación o rechazo del producto terminado.

Paralelo a ello el producto final estará manufacturado por un menor rango de variabilidad correspondiente al proceso abrasivo, lo que automáticamente genera menor dispersión sobre las características abrasivas o desgaste sobre el producto final a comercializar, lo cual tal y como se expuso con anterioridad servirá como herramienta de venta, la cual puede explotarse con el tiempo y la constancia de la administración en el objetivo, garantizando con ello un crecimiento sostenible en ventas al fortalecerse su diferenciador con respecto a la competencia, es decir que dicha metodología permitirá fortalecer la propuesta de valor con la cual la empresa hoy compite en el mercado internacional de denim.

## 6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Considerando el hecho que como empresa, se ha fomentado una cultura empresarial dinámica caracterizada por la búsqueda constantemente y sostenible de la mejora continua aplicada a técnicas manufacturables que permitan generar naturalidad sobre la apariencia *vintage* de las prendas que se comercializan, se tiene que en los últimos 5 años de operación se ha incrementado el riesgo operativo de producir unidades no conformes, en cuanto a propiedades físicas esto debido a que a nivel de empresa se carece de una correcta introducción de técnicas y químicos nuevos así como también no se cuenta con un sólido desarrollo de proceso que permita minimizar las posibles fallas en las formulaciones y por lo tanto cada día que pasa la pérdida en ventas por generar unidades no comercializables (rags) se hace más evidente en el estado de resultados de la empresa.

Lo anterior es la consecuencia a la falta de estandarización de proceso abrasivo y el poco conocimiento técnico sobre el comportamiento e influencia de las diferentes variables que rigen los procesos abrasivos enzimáticos lo cual hace que se incurran en fallos repetitivos e irreversibles, los cuales representan el 0,015 % de actual volumen de producción el cual es de 160 000 unidades semanales, dicho porcentaje equivale aproximadamente a una pérdida en ventas de \$ 50 000,00, semanales, esto es considerando el precio promedio de venta que se maneja.

Esta pérdida en ventas pone en riesgo las utilidades de la empresa y por lo tanto también pone en riesgo el trabajo directo de sus colaboradores, los cuales suman 4 500 empleados de forma directa y por lo tanto el no mejorar el

performance operativo del proceso de lavado puede impactar negativamente en la economía nacional, ya que la empresa al no percibir su objetivo de rentabilidad deberá diseñar estrategias encaminadas a reducir sus costos de operación y una de ellas puede ser recortar su mano de obra directa e indirecta para minimizar sus costos fijos de operación. Es por ello que este estudio de investigación cobra valor tanto para los intereses de la empresa como para también para los interés de la economía nacional del país, ya que las conclusiones a las que se lleguen con el experimento ayudarán a mejorar el performance operativo del área de lavado y con ello se mejorará la competitividad de la empresa aumentando con ello su actual nivel de exportación en aproximadamente \$ 200 000,00 mensuales y a la vez se logra emplear sosteniblemente al actual nivel de empleados.

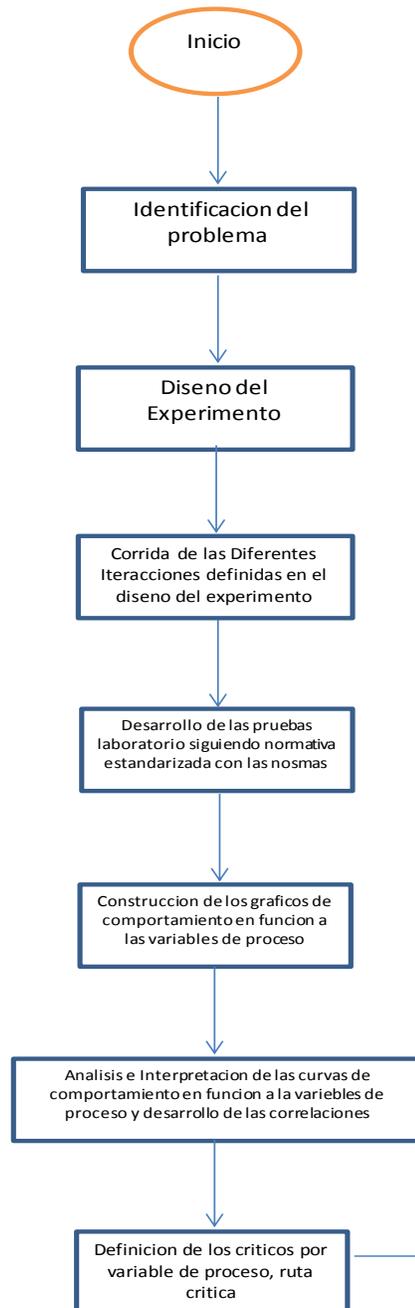
Para desarrollar el estudio de investigación, se diseñará de forma experimental una serie de iteraciones de abrasiones enzimáticas, las cuales permitirán evaluar el efecto de las diferentes variables que participan durante los procesos abrasivos de naturaleza enzimática, entre las que se puede mencionar temperatura, pH, porcentaje de enzima y tiempo.

Con los resultados obtenidos, se estará en la capacidad de obtener la correlación matemática que describa como cada una de estas variables influye directamente tanto sobre la apariencia visual de la prenda, como también sobre la influencia que las mismas llegan a generar sobre calidad de la prenda en cuanto a propiedades de tensión y rasgado se refiere. La construcción de dichos gráficos de comportamiento se construirán en función a los resultados de laboratorio que se obtengan para cada iteración y dichas pruebas estarán sustentadas mediante las Normas ASTM D5034 y D1424.

Además de ello estas curvas se convertirán en la herramienta necesaria para pronosticar cual debería ser el comportamiento esperado de un denim en cuanto a propiedades físicas se refiere, cuando el mismo se expone a condiciones similares a las ejecutadas en el experimento, es decir que el capturar, analizar e interpretar la información de laboratorio que resulten de las pruebas experimentales, ayudará a comprender el proceso enzimático con toda la magnitud de sus variables y en función a ello se podrán diseñar formulaciones que minimicen el riesgo de generar unidades no conformes, ya que al área técnica tendrá un mejor conocimiento científico de cuál será el comportamiento esperado al aplicar un proceso enzimático.

Es acá donde la implementación de la metodología DFSS cobra vital importancia para mejorar la competitividad de la empresa, ya que una vez definidas las curvas y las correlaciones del comportamiento de la fibra con respecto a cada variable, el siguiente paso lógico es analizar los críticos por variables y en función a ello definir desde la etapa de diseño cual debe la ruta crítica que permitirá generar formulaciones que permitan crear una apariencia vintage sobre las prendas denim pero sin afectar negativamente las propiedades físicas de la prenda. La generalización de las conclusiones permitirá mejorar el performance de la empresa y con ello la competitividad ante sus clientes, lo que se traducirá en un incremento en sus niveles de producción actuales y un mejor desempeño financiero.

Figura 1. **Esquema propuesto para la solución del problema identificado**



Continuación de la figura 1.



Fuente: elaboración propia.



## 7. ALCANCES

Para definir los alcances de la investigación se debe considerar que desde la perspectiva Investigativa el estudio tendrá un enfoque cuantitativo y el mismo permitirá determinar en forma experimental y con carácter explicativo - correlacionar cuál es el efecto de las variables del proceso enzimático: porcentaje en peso de la enzima celulosa, la temperatura de operación y el tiempo de proceso, sobre las propiedades físicas de la fibra de algodón cuando la misma es expuesta a un proceso abrasivo enzimático durante la etapa de lavado industrial de denim, con los resultados experimentales obtenidos a escala de laboratorio se podrá determinar la curva que describe el comportamiento de las propiedades físicas de la fibra de algodón cuando la misma se expone a un efecto enzimático bajo condiciones controladas de operación y el análisis e interpretación de dichas curvas permitirá predecir la calidad esperada de la prenda en función a sus propiedades físicas de tensión y rasgado (calidad de la prenda) determinadas mediante las Normas ASTM D5034 y ASTM D1424, respectivamente.

Con estas correlaciones se estará en la capacidad de mejorar el performance de la empresa ya que el análisis de las mismas permitirá maximizar la rentabilidad operativa al innovar su etapa creativa de diseño con formulaciones que empleen la Metodología de Design for six sigma (DFSS) en la etapa de abrasión enzimática, situación que mejorará la manufacturabilidad mediante procesos sostenibles y reproducibles a escala industrial que garanticen cumplir con la especificaciones técnicas del cliente en cuanto a parámetros de tensión y rasgado.

El experimento considera tan solo a una enzima celulasa así como la tela a emplear es de composición 98 % algodón y 2 % de spandex con un peso de 11 onzas por pulgada cuadrada.

Las conclusiones del experimento podrán ser generalizadas e implementadas por empresas manufactureras de *jeans* durante la etapa de lavado industrial que incluyan procesos abrasivos enzimáticos (biopulido) y que empleen como materia prima tela con composición 98 % algodón y 2 % spandex; definir la correlación de la calidad de la prenda en función a la variables que influyen en la etapa abrasiva mediante la implementación sistemática de la Metodología DFSS, generará un aporte significativo en busca de profesionalizar la industria textil en Guatemala, situación que se verá reflejada en el incremento de las exportaciones actuales lo cual será traducido como la maximización de la rentabilidad esperada para una lavandería industrial de denim.

Adicional a ello se debe considerar, en este caso en particular que dicha empresa manufacturera en el primer trimestre del 2014 emplea directamente a 4500 personas entre mano de obra directa e indirecta, para alcanzar la consecución de sus metas operacionales, por lo cual el aporte a la economía nacional de Guatemala también debe ser considerada como un factor de relevancia hacia los resultados obtenidos.

## 8. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

Hipótesis alterna (H<sub>i</sub>):

La calidad de un *jeans vintage* evaluada en términos de tensión y rasgado (libras fuerza/pulgada<sup>2</sup>), determinado mediante la Norma ASTM D5034 y D1424, está definida en función a las variables temperatura, pH solución, porcentaje en peso de enzima celulasa y al tiempo de proceso requerido en la formulación de la etapa de abrasión enzimática empleada para crear una apariencia *vintage* sobre el denim.

Hipótesis nula (H<sub>o</sub>):

La calidad de un *jeans vintage* en términos de tensión y rasgado (libras fuerza/pulgada<sup>2</sup>) determinado mediante la Norma ASTM D5034 y D1424 no está en función a las variables temperatura, pH solución, porcentaje en peso de enzima celulasa y al tiempo de proceso requerido en la formulación de la etapa de abrasión enzimática empleada para crear una apariencia *vintage* sobre el denim.

### 8.1. Variables cuantitativas

- Independientes
  - Temperatura proceso de abrasión
  - Porcentaje enzima celulasa empleada durante la abrasión
  - Tiempo de proceso del proceso enzimático

- Dependientes
  - Calidad de la prenda determinada en función a sus propiedades de tensión y rasgado
  - Incremento de la productividad definido en términos de reducción de reproceso.

## **8.2. Indicadores asociados a las variables cuantitativas dependientes**

- Porcentaje (%) de unidades no comercializadas por semana a causa de no cumplir con las especificaciones de tensión y rasgado (calidad prenda) definidas por el cliente.
- El total de lavados introducidos semanalmente en ambiente de producción que cumplan con la Metodología de Design For Six Sigma (DFSS) en cuanto a procesos abrasivos enzimáticos.
- Porcentaje de reproceso de lavado que se concreten semanalmente en ambiente de producción, originado por cambios en las condiciones de la etapa abrasiva enzimática.

## **9. MARCO TEÓRICO**

### **9.1. Generalidades**

La aplicación de enzimas en los diferentes sectores industriales se ha convertido en una verdadera revolución industrial, no menor al impacto producido por el uso del poder energético del vapor. Al igual que estos, se persigue encontrar nuevas posibilidades y productos que permitan hacer más eficientes los procesos productivos. (Mendez, R. 1999).

Con la experiencia adquirida en textiles durante 13 años, se han aprovechado los avances que se han logrado generar, específicamente en el proceso de lavado industrial de denim, gracias a los avances y adaptabilidad de los principios de la biotecnología, lo cual ha permitido hacer evolucionar el proceso de producción de lavado, a través de la aplicación de enzimas como la alfa-amilasa, celulasa y la lacasa, todas ellas con las ventajas de trabajar sobre sustratos específicos, reemplazar técnicas obsoletas y/o procesos costosos y lo más importante es siendo amigables con el medio ambiente, estas enzimas se hacen indispensables en la caja de herramientas de químicos e ingenieros involucrados en el medio.

La mezclilla o “denim”, creada en el siglo XVII, debe su nombre a su lugar de origen Serge De Nim, en Francia. Un producto creado por los franceses, perfeccionado por los ingleses y convertido en prenda de vestir (pantalones) a finales del siglo XVIII, en Estados Unidos por dos inmigrantes un Báltico (David Jacob), su creador y un Babario (Levi Strauss), su comerciante.

Los pantalones de mezclilla (*jeans*), creados para trabajar, en un inicio utilizados por los operadores mineros y granjeros han evolucionado al ser igualmente vestidos por presidentes, ministros etc., hasta formar parte en la colección de los famosos diseñadores de moda; esta evolución ha demandado al mismo tiempo del desarrollo de la industria textil y más relevante, aun en el área de lavanderías industriales.

Cliff Abbey, dueño de Sutter Jeans en San Francisco, California, USA, otorga los créditos de la creación del proceso de lavado industrial de pantalones de mezclilla a Nudie Cohen, reconocido en Hollywood por sus tiendas Tailor y Western Wear, vendía sus productos a estrellas de cine. Nudie tenía una máquina lavadora y piedra pómez, en donde aplicando esta técnica suavizaba y abradía los pantalones, para tener una apariencia de desgaste natural y no se vieran nuevos al ser utilizados por los actores en las películas. Esto fue en 1973 y se cree que estuvo aplicando esta técnica desde aproximadamente quince años atrás. (Mills, C 2004)

El uso de piedras para abradir *jeans* es un proceso de ciclos largos, que deprecia las máquinas lavadoras de forma acelerada. Gracias a los avances biotecnológicos a través del uso de enzimas, en este caso celulasa, combinadas con cantidades menores de piedra, producen el efecto de desgaste requerido, que hace un proceso más eficiente. La historia moderna de las enzimas tiene información que data desde 1833 con Payen y Persoz y el uso de la diastasa, para convertir almidón en azúcar, primariamente maltosa. Estudios del uso de la malta por Berceilius en 1835 y los hermanos Buchner, responsables de la creación del término enzima en 1897, que proviene del griego “En” que significa dentro y “Zyme” que significa levadura; ellos usaron el término para describir las sustancias dentro de la levadura que eran

responsables de la fermentación. En 1903 Victor Henri realizó estudios de la cinética involucrada.

El postulado matemático de la acción enzimática

$E + S \rightleftharpoons ES$  (E enzima y, S sustrato)    junto con una

Reacción #1

Segunda reacción  $ES \rightleftharpoons P + E$  (P es producto)

Reacción # 2

Fue propuesto por Leonor Michaelis y Maud Menten, en 1913.

Sin embargo, el hecho de tratar las enzimas, como macromoléculas de proteínas, fue descubierto por James Sumner en 1926. El descubrimiento del almacenamiento de la información genética por medio de cromosomas como el Ácido Desoxiribonucleico (DNA) en 1944 y la propuesta de la estructura doble helicoidal en 1953 por James Watson y Francis Crick, son hechos trascendentes que han empujado la posterior producción a nivel industrial de enzimas. En 1952, la compañía Novozymes produjo la primera enzima producida por fermentación, que abrió paso a la producción a escala de esta importante industria. (Corporation, W.B. 2013).

Los fabricantes de enzimas, para aplicación textil, inician su producción formalmente en la década de los 80, y la industria de lavado industrial se ha adaptado rápida y fácilmente a sus productos. Por más de un siglo, el almidón ha sido un engomante común y esencial en la fabricación de textiles, sin embargo, para poder dar un acabado (teñido o blanqueo) a la tela y a prendas confeccionadas, es necesaria la eliminación del mismo. (Corporation, W.B. 2013).

Esto hizo que desde la década de los 70's se utilizará alfa amilasa en las textileras, como medio de eliminación del almidón y más tarde, en los 80's, se introduce la aplicación de la técnica en los procesos de lavado industrial. En 1983 Godfrey y Reichelt publicaron su estudio sobre la composición del algodón (materia prima de la mezclilla) constituida mayormente por celulosa, un polisacárido formado por unidades de glucosa. Más tarde en 1986 Boyce analizó preparaciones de endocelulasas y exocelulasas, para aplicación sobre el algodón.

En 1996 se realizaron los primeros estudios de aplicación de enzima lacasa para degradar el colorante índigo de la mezclilla, sin embargo, las condiciones extremas de operación y manejo no proporcionaban ninguna ventaja. Esta retroalimentación permite que a finales de 2009 se hagan las mejoras correspondientes e inicie su respectiva comercialización, que ha tomado tiempo por sus antecedentes de operación.

Todas las enzimas, que son cadenas largas de proteínas, son específicas y biodegradables, para conseguir sus actividades máximas requieren de sus condiciones óptimas de operación, en cuanto a control de pH y temperatura.

Las lavanderías industriales tienen presencia alrededor del mundo y en las últimas dos décadas y lo que va del nuevo milenio, se han desarrollado a pasos agigantados, no solo por la demanda del mercado, sino, con la implementación de máquinas de mayor capacidad y el desarrollo de nuevos productos químicos, como las enzimas.

Por otro lado, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, solo se han desarrollado dos estudios relacionados con el tema. Santizo, 1995 La importancia del descruce del hilo de algodón en el proceso de tintura artesanal, García, 1996 *Optimización del grado de blanco y absorción de los tejidos de punto 100 % algodón*, y un estudio sobre el proceso de lavado industrial de pantalones de mezclilla, Méndez, 1999 *Estudio comparativo en la aplicación de celulasa ácida y neutra, en el paso de abrasión, en un proceso de lavado industrial a pantalones de mezclilla con piedra pómez*.

Dichas tesis representan una evolución de los avances en la industria textil y el área de lavanderías en Guatemala. El presente informe describe, de manera general, el proceso de elaboración de tela, el proceso de lavado y la aportación de la biotecnología en el área textil, por medio de conceptos, técnicas, procedimientos y químicos utilizados, que permiten buscar nuevas opciones en el proceso de lavado industrial de pantalones de mezclilla.

## 9.2. Proceso de lavado industrial de denim

Dicho proceso industrial de lavado de denim consiste y depende de los diversos patrones de efecto requeridos en la apariencia de la prenda terminada. En el mismo, se involucra la calidad del agua que se va a utilizar en el proceso, las condiciones y tipo de maquinaria, con sus indicadores de temperatura, nivel o volumen de agua, velocidad de rotación, control del tiempo de ciclos y, en algunas, el pH; y finalmente lo más relevante, que marca la diferencia entre una y otra lavandería. La formulación del proceso, en donde utilizando herramientas químicas, como las enzimas, tenso activos, agentes oxidantes, bases, polímeros (humectantes, lubricantes, dispersantes, suavizantes, etc.), entre otros, y físicas como la piedra pómez, perlita expandida, tierra de diatomáceas etc., se genera una cantidad incontable de técnicas aplicadas por ingeniosos y químicos, que crean una tendencia que puede llegar a ser única y exclusiva, pero que generalmente se ha estructurado en la siguiente secuencia de pasos: (Mendez, R .1999).

Con base en la experiencia profesional, se puede reafirmar que los elementos que forman parte del lavado industrial, el que representa los mayores retos es tanto el diseño de la formulación, como el hecho el mantener bajo control estadístico a cada una de las variables que definen el resultado obtenido las diferentes etapas del lavado las cuales son:

- Desengomado
- Abrasión
- Desactivación
- Reducción
- Blanqueo
- Neutralizado

- Suavizado

### **9.3. Desengomado**

El objetivo de este paso es remover y eliminar los agentes engomantes, que han sido aplicados al hilo de urdimbre, así como otros productos aplicados en el paso de terminado del tejido. Los engomantes comúnmente utilizados son: a) el almidón natural proveniente de arroz, maíz o papa, según sea la región en donde opera la textilera, b) PV-OH (polivinilo alcohol), polímero sintético de bajo costo, c) CMC (carboximetilcelulosa) d) PVA (polivinilo acrilato); e) ceras, que pueden ser naturales o sintéticas, y f) surfactantes, humectantes o lubricantes. Para la remoción de los distintos engomantes, se utilizan en algunos casos productos químicos específicos y en otros en conjunto, que permiten eliminar las gomas utilizadas y obtener mejores resultados en las etapas subsiguientes.

Dentro de los agentes químicos utilizados para el efecto, se encuentran: 1) alfa amilasa, 2) álcalis, 3) peróxidos, 4) surfactantes, 5) ácidos. Cada uno de éstos, según se requiera, debe de trabajar en sus condiciones óptimas de operación (temperatura, relación de baño, tiempo). Es importante realizar un buen trabajo en esta etapa, ya que un mal desengome puede rayar las prendas y hacer que tengan apariencia de quiebres visibles por el cambio de color, respecto a la apariencia global de las prendas, así como consecuencias en el ciclo de la siguiente etapa, la abrasión. (Olson, L.A. 2005)

Los engomantes mayormente utilizados son una combinación de almidón y polivinilo alcohol o polivinilo acrilato y surfactantes, para lo cual se han diseñado dos tipos de desengome, ambos normalmente con una relación de baño 1:8, el enzimático y el oxidativo.

#### **9.4. Desengome enzimático**

Este consiste en retirar almidón, a través de una reacción química, es decir, romper la estructura química del almidón por “digestión enzimática” de la alfa amilasa, con la formación de pequeñas cadenas de materiales solubles (dextrinas, maltosas y azúcares). Este paso requiere normalmente de una temperatura entre 50-65 °C, un pH 7-8,5, un ciclo de 10 a 15 minutos, y es auxiliado por dispersantes de algodón, humectantes y lubricantes, para completar efectivamente el proceso. (Olson L.A. 2005).

Con respecto a este proceso a lo largo de estos años, en la rutina diaria de una lavandería, este es el tipo de desengome que se practica con mayor frecuencia, ya que representa menos costos operativos y a la vez asegura la manufacturabilidad de los lavados, en un 99,9 % de la veces la tela queda completamente preparada para absorber correctamente los químicos que se emplearán en las siguientes etapas del proceso de lavado industrial.

#### **9.5. Desengome oxidativo**

Este tipo de desengomante consiste regularmente en un agregado de productos, como el peróxido de hidrógeno y su estabilizador, combinado con álcalis. En otras ocasiones, combinado con detergentes y humectantes, se requiere de una temperatura entre 60-75 °C, un pH alcalino y un ciclo mediano entre 15 y 20 minutos. El peróxido de hidrógeno no solamente permite romper múltiples puntos de la molécula de almidón, sino también es efectivo ante engomados de polivinilo alcohol y polivinilo acrilato. (Olson L.A. 2005). A pesar de lo anterior se tiene que tomar en cuenta que por experiencia se sugiere que dicho desengome se aplique únicamente cuando se estén formulando procesos para lavados muy claros y en donde la coloración rojiza no sea un detalle de no

conformidad, ya que este proceso tiende a virar el *cast* de la tela a un tono rojizo, que en muchas veces tiende a influir en la apariencia final de la prenda.

## **9.6. Abrasión “StoneWash”**

Esta etapa persigue dar un aspecto de envejecimiento a las prendas, una apariencia de desgaste homogénea, que deja puntos más blancos en su superficie de manera aleatoria. El contraste, entre esos puntos blancos adicionales y la superficie azul normal, indica la intensidad del lavado. Se puede obtener este efecto por medio de tres técnicas, la abrasión mecánica, la abrasión química o enzimática y la combinada. (Mendez, R 1999)

### **9.6.1. Abrasión mecánica (Olson L. A. 2005)**

Es pura abrasividad, en que se usa normalmente piedra pómez, aunque en la actualidad también se puede incluir perlita expandida o tierra de diatomáceas. Es un proceso que requiere ciclos largos, con una relación de baño baja 1:5. Fue el primer método de abrasión para obtener el efecto de desgaste. La abrasividad sobre la superficie del tejido lleva a una liberación de fibrilas, que dan al tejido la suavidad conocida como peletización o piel de durazno. A pesar de hermoso efecto alcanzado, la principal desventaja de las piedras es el daño que se le ocasiona a la maquinaria, que periódicamente requieren el cambio de las láminas de la canasta; asimismo, demandan una mayor mano de obra para sacar las piedras, las cuales en algunas ocasiones llegan contaminadas al proceso, por medio de otros materiales que provocan daños a las prendas. (Lam, J 2001).

### **9.6.2. Abrasión química o enzimática**

Las enzimas biológicas del tipo de celulasas son utilizadas; estas atacan la superficie de los hilos de algodón, y hacen que el colorante índigo se escame. Existen las del tipo ácidas, que trabajan a pH de 4,5-5,5; las de tipo Neutras, que trabajan a pH de 6,5-7,5, y las híbridas, que trabajan a pH de 5,5-6,5. Regularmente estas enzimas trabajan con nivel bajo de agua en relación con 1:5, a temperatura de 50-60 °C. Se debe evitar que, para tener constante la temperatura del proceso, se aplique vapor vivo a la máquina, ya que esto inhibe o destruye la actividad de las enzimas. La aplicación de estas ha colaborado en la reducción de los ciclos de esta etapa. (Olson, L.A. 2005)

### **9.6.3. Abrasión combinada (mixta)**

La abrasión combinada no es más que combinar la aplicación de agentes abrasivos mecánicos, como la piedra pómez, con los agentes químicos, las enzimas celulasas, etc. Esta mezcla ha permitido evolucionar la industria de lavado y obtener productos de mejor calidad, con un mejor costo y en un medio más sustentable.

### **9.6.4. Efecto de la temperatura**

Como se conoce en el medio, las enzimas tienen una temperatura óptima de operación, en la que su actividad es la máxima, que oscila en la actualidad de 45-60 °C. Sin embargo, fuera de ese rango y especialmente a mayor temperatura regularmente 70 °C, se consigue la inhibición de dicha actividad. Es mejor realizar este incremento de temperatura por medio de la alimentación de vapor vivo o directo. (Mendez, R. 1999)

#### **9.6.5. Efecto del pH**

Al igual que la temperatura, el pH también juega un papel importante para obtener las condiciones óptimas de actividad de las enzimas utilizadas en el proceso. Este, como se mencionó en la etapa de abrasión química o enzimática, puede variar según la familia de celulasas, ácida, neutra o híbrida. Sin embargo, para ambos casos, se puede incrementar el pH arriba de 9 por medio de detergentes o álcalis, para que se inhiba la actividad enzimática. (Mendez, R 1999)

#### **9.7. Desactivación**

Este paso se hace necesario para inhibir y parar la actividad de las enzimas celulasas, que pueden llegar a destruir el tejido ocasionando una pérdida considerable en los parámetros físicos de resistencia; esta se puede realizar de dos formas, por efecto de la temperatura y / o por el pH.

#### **9.8. Reducción**

Recientemente fue introducido en la formulación del proceso de lavado industrial de pantalones de mezclilla, persigue por medio de la reducción de la molécula del colorante de índigo, a través de la enzima lacasa, para obtener una apariencia más limpia de la trama, que hace que se realce el contraste o abrasión en la superficie de la prenda, y decolora o reduce el color original del índigo, al utilizar menos oxidantes, hipoclorito de sodio, en la etapa de blanqueo. En esta etapa, también se ha evaluado el uso de dextrosa anhidra grado industrial, en condiciones alcalinas de pH mayor que 12 y a alta temperatura 85-90 °C, que por sus condiciones de operación, se convierte en

un paso de alto riesgo, ya que puede provocar accidentes, lo cual limita su uso. (Lam, J 2000)

### **9.9. Blanqueo**

En esta etapa, se pueden utilizar diferentes agentes oxidantes de índigo, los cuales varían en función de sus características finales y costos de operación. En este paso de decoloración, pueden ser utilizados el hipoclorito de sodio (NaOCl) y el permanganato de potasio (KmnO<sub>4</sub>). (Lam, J 2000)

### **9.10. Blanqueo con hipoclorito de sodio**

Este fue el primer agente oxidante utilizado en el proceso de lavado industrial de pantalones de mezclilla; para su mejor control debe de aplicarse en condiciones alcalinas, con una relación de baño alta 1:10 y a temperatura de 60 °C. Desafortunadamente este está en equilibrio con el ácido hipocloroso sobre un extenso rango de pH. Dicho equilibrio provoca daños a la fibra de algodón de la tela, así como una disminución en los parámetros físicos de resistencia al rasgado y a la tensión. Sin embargo, es la técnica más efectiva para la reducción de la intensidad de índigo, por lo que su aplicación se hace necesaria para determinadas apariencias de color. (Mendez, R 1999)

### **9.11. Blanqueo con permanganato de potasio**

En la práctica, este agente es más eficiente en la reducción de color y daña menos la celulosa del algodón. Sin embargo, la limpieza de los residuos de la reacción es más difícil de controlar, que la neutralización del cloro y ocasionan manchas de color café-rojizo sobre la superficie de las prendas. (Lam, J 2000)

### **9.12. Neutralizado**

La función básica de este paso consiste en la eliminación de los productos utilizados en la etapa de blanqueo, ya que su presencia puede provocar, no solo problemas de calidad en apariencia, sino de resistencia al mismo tiempo. Para el caso de neutralización de hipoclorito de sodio, es común utilizar meta bisulfito de sodio, o peróxido de hidrógeno en condiciones alcalinas. Para el caso del permanganato de potasio, aparte de los dos ya mencionados para el cloro, se puede agregar el sulfato de hidroxilamina. (Lam, J 2000)

### **9.13. Suavizado**

El objetivo de este paso consiste en dar a las prendas una mayor comodidad, que se percibe entre el contacto de la piel con los pantalones, a través del tacto suave de las mismas, y al mismo tiempo proveer ciertas características de protección a las prendas, contra el efecto de oxidación del ozono. Para obtener las propiedades de suavidad deseada, debe de controlarse la relación de baño 1:5; la temperatura, regularmente de 50 °C y pH óptimos, normalmente entre 4,5 y 7; en la actualidad, se han desarrollado algunos suavizantes, que en combinación con algún colorante, proveen una tonalidad especial en la apariencia. (Mendez, R 1999)

Los diferentes tipos de suavizante proveen a la prenda características especiales, que en general permiten absorber humedad del medio ambiente, lo que hace que el algodón de la fibra tenga un tacto más suave, entre los diferentes tipos se tiene los catiónicos, los siliconados y polietilenos, así como los productos que conllevan la combinación de los mismos, para poder ser multifuncionales.

#### **9.14. Factores de consideración en la calidad de la prenda confeccionada (Freeman 1995)**

Los acabados de artículos confeccionados pueden plantear algunas dificultades susceptibles de causar pérdidas de calidad y, por consiguiente, originar reclamaciones costosas (Sandoz, 1,990). Conviene examinar estas dificultades más de cerca:

- Accesorios

Los accesorios representan el problema principal. Por accesorios se entienden: todos los elementos que sirven para coser, completar y decorar los textiles.

- Encogimiento

Un fuerte encogimiento de los artículos o el encogimiento irregular de sus diversos elementos producen artículos de mala calidad o incluso inadecuados al uso. El encogimiento no debería ser superior a un 4 %.

- Zonas de abrasión/pliegues

Ciertas zonas de abrasión, no deseadas, pueden producirse en la superficie de los artículos sensibles, debido al tratamiento mecánico en la máquina de tambor. Esto determina la calidad del artículo final.

### **9.15. Prevención de la contaminación (Freeman, 1995)**

En la prevención de la contaminación se puede seguir el siguiente modelo: primero, reducir los desperdicios en el origen, a través de mejoras y mantenimiento, modificaciones en el diseño del producto, procesamiento y selección de materia prima, luego, si se produce desperdicio, reciclar lo que se pueda para reutilizarlo en el proceso. Finalmente, si no hay opción de prevención posible, tratar y desechar los desperdicios de una manera segura.

Así como en la mayoría de operaciones de manufactura, en la industria textil se pueden realizar reducciones sustanciales en los desperdicios a través de buenas prácticas de operación, sin mayor inversión en tecnología nueva. Estrategias fuera del proceso incluyen mejorar el mantenimiento del equipo (reparar fugas en tuberías, válvulas y sellos de bombas), manejo de materiales (control de inventarios, spills) y planeación de la producción. Por ejemplo, con el gran número de etapas del proceso y químicos utilizados en la preparación de la tela, teñido, y acabado, es crucial mantener segregados los diferentes tipos de efluentes para facilitar una separación y recuperación efectiva de los químicos utilizados en el proceso y el agua.

Generalmente, cuando una descarga es muy diluida y compleja es más difícil tratarla y recuperar los componentes valiosos. Idealmente, cada etapa (o grupo similar de descargas) debería tener su propio sistema de recuperación para maximizar la eficiencia de las separaciones y el costo.

Antes de unas buenas prácticas de operación, el foco central, para mejorar la prevención de la contaminación en la manufactura de textiles, está en la reducción del consumo de agua, químicos y energía y en la utilización de

compuestos menos peligrosos, más eficientes y recuperables a través de la sustitución de materiales, cambios al proceso, y estrategias de reuso.

#### **9.16. Biotecnología. (Kirk R.E, 1962)**

Esta es considerada la tercera revolución industrial, comparada con el poder energético del vapor y los microprocesadores, ya que al igual que éstos ha transformado el mundo en el que vivimos; ha creado nuevos productos y posibilidades, a través de la aplicación sistemática de la ciencia biológica, es decir, con el uso de los sistemas vivos y sus productos. Por muchos años, el hombre ha utilizado organismos celulares simples como la levadura, en la producción de pan, cerveza y vino. (Penet, CS 1991). Otro caso es el de los microbios utilizados para elaborar alimentos y que han sido la base del desarrollo de la industria farmacéutica, aun en ese momento con la ignorancia, en muchos casos, de la ciencia involucrada; por eso la ciencia biológica y lo más reciente la ingeniería genética han tomado parte en investigaciones, que ayuden a comprender y manejar sistemática e inteligentemente a estos seres vivos y sus derivados.

La explotación comercial de las células o de las enzimas, tomadas de las células, está restringida a las condiciones óptimas, en las que pueden funcionar los sistemas biológicos (pH, temperatura etc.). La ingeniería genética ha realizado avances en la estabilidad, economía, especificidad y campos de aplicación de las enzimas.

### **9.17. Enzimas (Penet, CS 1991)**

Las enzimas son un tipo especial de proteínas de cadena larga de aminoácidos, que se encuentran en la materia viva. El ser humano, los animales, las plantas etc., todas las células vivas necesitan enzimas para vivir y crecer y, aunque son fundamentales para la vida, no son sustancias vivas. Estas también pueden ser producidas por microorganismos, como las bacterias y los hongos, mediante la degradación de un sustrato. Las enzimas son catalizadores, es decir, sustancias que en cantidades muy pequeñas aceleran las reacciones químicas; son específicas, ahorran energía y son biodegradables. Pueden producirse de forma industrial y tienen una variedad de aplicaciones en el sector industrial, como son la industria farmacéutica, alimenticia (humana y animal), cervecera, viñeras, pulpa y papel, destilación/combustibles de alcohol y textil, entre otras.

### **9.18. Enzimas en la industria textil**

Las enzimas tienen una aplicación amplia en este sector industrial y han hecho eficientes los métodos de producción y acabado en las telas. Las principales en el proceso de lavado industrial son la alfa amilasa, celulasas y la lacasa; en el área de detergentes para lavados caseros, también se utiliza las proteasas y lipasas. (Olsen H.S. 2000)

### 9.18.1. Alfa amilasa

El almidón es uno de los compuestos más comunes en el engomado de tela, y la amilasa ha sido el producto más eficiente para eliminarla sin dañar la fibra, la cual se aplica en el paso de desengomado bajo las condiciones óptimas. Esta actúa sobre la molécula de almidón hidrolizándolo, es decir, rompiendo la cadena larga en pequeñas secciones.

La alfa amilasa ataca al almidón, en el enlace 1-4, y produce azúcares reductores de la siguiente manera:



Reacción # 3

Esta reacción requiere de una cantidad significativa de oxígeno, para que lentamente continúe su degradación.

### 9.19. Celulasas

Las celulasas son una herramienta fundamental en el proceso de lavado industrial de pantalones de mezclilla, y han sido un bastión en la evolución del desarrollo de esta industria, ya que permiten obtener la apariencia de desgaste superficial, abrasión, sin dañar la maquinaria, como ocurría al realizarlo únicamente con piedra, y a la vez han contribuido con la reducción de ciclos de proceso. Las celulasas hidrolizan los enlaces glucosídicos en la celulosa del algodón, al igual que la amilasa en el almidón. (Mendez, R 1999)

Las celulasas se pueden clasificar en tres tipos, de acuerdo con el pH óptimo, en el que alcancen su máxima actividad, ácidas pH 4,5-5,5, neutras pH 6,5 -7, e híbridas 5,5-6,5; debido a las características del acabado y las propiedades remanentes de resistencia, son las celulasas neutras las más utilizadas.

### **9.19.1. Lacasa**

La enzima lacasa es la más reciente herramienta de trabajo en las lavanderías industriales. Es una oxidoreductasa, conocidas también como Redox; como su clasificación lo indica, este tipo de enzimas cataliza reacciones químicas de reducción y oxidación. Esta se produce por medio de un microorganismo llamado Lacquer tres (*Rhus Vernicifera*), aunque se han realizado estudios para obtener otras fuentes como el fungus *Trametes villosa*. (Olson L.A. 2005).

La lacasa es una oxidasa multicomponente, que cataliza la oxidación de una gama amplia de fenoles y otras sustancias; acompañado con la reducción de oxígeno del agua, ha encontrado aplicación en la delignificación y detoxificación, y recientemente en el blanqueo de índigo. La molécula de índigo sobre la superficie de la tela está empaquetada y densa; este ambiente de hidrofobicidad hace inaccesible la acción de la enzima sobre el colorante. De cualquier forma, cuando la enzima se hace acompañar por un mediador apropiado, la decoloración toma lugar, ya que el índigo transfiere electrones al oxígeno, vía la enzima y el mediador. El mediador es un compuesto orgánico de bajo peso molecular, que hace accesible la insoluble molécula de índigo.

Al igual que las otras enzimas utilizadas en el proceso, se requiere el control de las condiciones óptimas del proceso, como son la relación de baño regularmente 1:7, la temperatura óptima sugerida por los proveedores es de 70 °C y el pH 4,5. La actividad enzimática puede ser seriamente afectada por cambios radicales de temperatura, al introducir vapor vivo al sistema, lo cual desnaturaliza las enzimas. (Mendez, R 1999).

### **9.20. Desing For Six Sigma (DFSS)**

La rama de Six Sigma que le permite prevenir los defectos que se produzcan en el primer lugar a través del diseño superior, basado en la Voz del Cliente (VOC).

Diseño para Six Sigma (DFSS) es la aplicación de los principios Six Sigma para el diseño de productos y sus procesos de fabricación y de apoyo. Mientras que Six Sigma, por definición, se centra en la fase de producción de un producto, DFSS se centra en la investigación, el diseño y las fases de desarrollo. (Horbal, R., R. Kagan y R. Koch 2008)

DFSS combina muchas de las herramientas que se utilizan para mejorar los productos o servicios existentes y se integra la voz del cliente y los métodos de simulación para predecir el nuevo proceso y el rendimiento del producto. DFSS puede ser comparado con DMAIC (Diseño, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) y, a menudo el acrónimo DMADV (Definir, Medir, Analizar, diseño, verificación) se utiliza para describir la estrategia de DFSS. Las fases o pasos precisos de una metodología DFSS no son universalmente definidas. La mayoría de las organizaciones implementarán DFSS para adaptarse a su negocio, la industria y la cultura. Metodología DFSS, en lugar de la metodología DMAIC, se debe utilizar cuando (Dennis, P. 2002):

- Un producto o proceso no está en existencia en su empresa y hay que ser desarrollados

El producto o proceso existe y ha sido optimizado (usando DMAIC o no) y todavía no cumple el nivel de las especificaciones del cliente o Seis Sigma nivel DFSS es una forma de implementar la metodología Seis Sigma lo antes posible en el producto o servicio del ciclo de vida posible. Se trata de una estrategia hacia el retorno de la inversión extraordinaria a través del diseño para satisfacer las necesidades de los clientes y la capacidad del proceso. DFSS puede producir el mismo orden de magnitud de los beneficios financieros como DMAIC. (Dennis, P. 2002)

Pero también en gran medida ayuda a una organización innovar, superar las expectativas de los clientes, y convertirse en un líder en el mercado. ¿DFSS es el enfoque Seis Sigma a diseño? Es decir, el diseño de productos que son resistentes a las variaciones en el proceso de fabricación. Usando DFSS significa el diseño de calidad en el producto desde el principio. Que están impidiendo que la variación desperdicio antes de que suceda, por lo tanto ser capaz de identificar y corregir problemas a tiempo, cuando los costos de la solución son menores. Una implementación exitosa requiere de DFSS los mismos ingredientes que cualquier otro proyecto Seis Sigma: un importante compromiso y el liderazgo de la parte superior, la planificación que identifica y establece objetivos mensurables del programa y calendario, así como la formación y la participación de todos.

La planificación de DFSS requiere recopilar la información necesaria que permita la producción libre de errores de libre de defectos de productos y procesos que satisfagan al cliente de forma rentable. DFSS intenta predecir cómo los diseños en cuestión se comportan y para corregir las variaciones

antes de que se produzca. Eso significa que la comprensión de las necesidades reales de sus clientes y traducir esas necesidades vitales en las características técnicas del producto y, finalmente, en crítico para la calidad (CTQ) las características del producto y de proceso. A continuación, puede utilizar el diseño de experimentos (DOE) para desarrollar un diseño robusto, que optimiza la eficiencia y reduce los defectos. (Hobbs, D. 2004)

Indicadores válidos y confiables para monitorear el progreso del proyecto se estableció al principio del proyecto, durante la fase de la medida si se utiliza DMADV. Insumos clave son priorizadas para establecer una lista corta para estudiar con más detalle. Con una lista de prioridades de los insumos en la mano, el equipo de DFSS determinará las maneras posibles el proceso podría ir mal y tomar medidas preventivas para mitigar o prevenir los fracasos. A través del análisis, el equipo de DFSS puede determinar las causas del problema que necesita mejorar y cómo eliminar la brecha entre el desempeño actual y el nivel de rendimiento deseado. Esto implica descubrir por qué los defectos son generados por la identificación de las variables clave que son más susceptibles de crear la variación del proceso. Modal de Fallos y Efectos Análisis (AMFE) y determinación de fracaso anticipado (AFD) se puede utilizar tanto para el diseño del producto y el diseño del proceso. (Hobbs, D. 2004)

DFSS proporciona una forma estructurada para usar de manera constructiva la información obtenida de estos análisis. Armado con datos reales producidos por el proceso de DFSS, puede desarrollar los procesos de fabricación competentes y elegir los procesos que son capaces de satisfacer los requisitos de diseño. Un análisis más detallado se puede verificar y validar que el diseño del producto cumple con los objetivos de calidad. Esto se puede lograr a través de revisiones por pares, revisiones de diseño, simulación y análisis, las

pruebas de calificación, o las pruebas de validación de producción. (Horbal, R., R. Kagan y R. Koch 2008)

Los beneficios de DFSS son más difíciles de cuantificar y son más a largo plazo. Se puede tomar más de seis meses después del lanzamiento del nuevo producto antes de que usted comience a ver la verdadera medida de las mejoras del proyecto. Sin embargo, el eventual retorno de la inversión puede ser profundo (Dennis, P. 2002). Esto es especialmente cierto cuando la organización puede usar el proyecto DFSS como una plantilla para introducir cambios fundamentales en la manera en que desarrolla nuevos productos y procesos en toda la organización.

DFSS trata de evitar la fabricación / servicio de los problemas del proceso mediante el uso de servicios avanzados de voz de las técnicas del cliente y las técnicas apropiadas de ingeniería de sistemas para evitar problemas en el proceso desde el principio (es decir, la prevención de incendios). Cuando se combinan estos métodos de obtención de las necesidades propias del cliente, y obtener los parámetros del sistema de ingeniería de requerimientos que incrementan la efectividad del producto y el servicio a los ojos del cliente. Esto proporciona productos y servicios que proporcionan una mayor satisfacción del cliente y el aumento de las técnicas de share.

El mercado también incluye herramientas y procesos para predecir, modelar y simular el sistema de entrega del producto (los procesos / herramientas, personal y organización, capacitación, instalaciones y logística para producir el producto / servicio), así como el análisis del ciclo de vida del sistema de desarrollo propio para garantizar la satisfacción del cliente con la solución de diseño del sistema propuesto. De esta manera, DFSS está estrechamente relacionado con la ingeniería de sistemas, investigación de

operaciones (la solución del problema de la mochila), arquitectura de sistemas e ingeniería concurrente.

DFSS es en gran parte una actividad de diseño que requiere herramientas especializadas, incluyendo: Quality Function Deployment (QFD), el diseño axiomático, TRIZ, diseño de X, el diseño de experimentos (DOE), los métodos de Taguchi, el diseño de la tolerancia, robustification y la metodología de superficie de respuesta. Aunque estas herramientas se utilizan a veces en el clásico DMAIC Six Sigma, que son los únicos utilizados por DFSS para analizar los sistemas nuevos y sin precedentes / productos.

#### **9.21. DFSS como un enfoque para diseñar**

Se puede afirmar con base en la experiencia adquirida, que el DFSS trata de evitar problemas en el proceso de fabricación/servicio mediante el uso de voz avanzado de las técnicas de los clientes y las técnicas de ingeniería de sistemas adecuados para evitar problemas de proceso desde el principio. Cuando se combinan, estos métodos de obtención de las necesidades propias del cliente, y se derivan requisitos de los parámetros del sistema de ingeniería que aumentan la efectividad del producto y el servicio en los ojos del cliente y todas las demás personas.

Estos productos y servicios que proporcionan una gran satisfacción de los clientes y el aumento de la cuota de mercado rendimientos. Estas técnicas también incluyen herramientas y procesos para predecir, modelo y simular el sistema de entrega de producto, así como el análisis del ciclo de vida del sistema en sí con el desarrollo de resultados de la investigación y ganancias adecuadas para garantizar la satisfacción absoluta del cliente con la solución de diseño del sistema propuesto. (Hobbs, D. 2004).

De esta manera, DFSS está estrechamente relacionado con la ingeniería de sistemas, investigación de operaciones, arquitectura de sistemas, el equilibrio del flujo de trabajo, y la ingeniería concurrente y mucho más. DFSS es en gran parte una actividad de diseño que requiere herramientas especializadas, incluyendo: el despliegue de la función calidad, diseño axiomático, TRIZ, diseño de X, diseño de experimentos, métodos Taguchi, diseño de la tolerancia, robustificación y metodología de superficie de respuesta para una sola o múltiples optimización de la respuesta. Si bien estas herramientas se utilizan a veces en el proceso clásico DMAIC Seis Sigma, que se utilizan de forma única por DFSS para analizar nuevas y sin precedentes sistemas/productos. (Shingo, S 1989).

#### **9.22. Distinciones de DMAIC (Dennis, P. 2002)**

Los defensores de las técnicas de DMAIC y Lean pueden afirmar que DFSS cae bajo la rúbrica general de Six Sigma y Lean Six Sigma. Se ve a menudo que las herramientas que se utilizan para las técnicas de DFSS varían ampliamente de los utilizados para DMAIC Seis Sigma. En particular, los médicos suelen utilizar DMAIC nuevos o existentes, dibujos mecánicos y las instrucciones del proceso de fabricación como la información proveniente de realizar su análisis, mientras que los médicos DFSS menudo utilizan simulaciones de sistemas y herramientas de diseño/análisis de sistemas paramétricos para predecir los costos y el rendimiento de arquitecturas de sistemas candidatos.

Si bien se puede afirmar que ambos procesos son similares, en la práctica el medio de trabajo se diferencia lo suficiente para que DFSS requiera diferentes conjuntos de herramientas para llevar a cabo sus tareas de diseño del sistema. DMAIC Six Sigma puede todavía utilizar durante *depth-first* se

sumerge en el análisis de la arquitectura del sistema y para el "*back end*" procesos Six Sigma, DFSS proporciona procesos de diseño de los sistemas utilizados en el diseño de *front-end* de sistemas complejos. (Dennis, P. 2002)

### **9.23. Similitudes con otros métodos**

Los argumentos acerca de lo que hace DFSS diferente de Six Sigma demostrar las similitudes entre DFSS y otras prácticas de ingeniería establecida, tales como el diseño probabilístico y diseño de calidad. En general Six Sigma DMAIC con su plan de trabajo se centra en la mejora de un proceso o procesos existentes. DFSS se centra en la creación de nuevo valor con las aportaciones de los clientes, los proveedores y las necesidades empresariales. Mientras tradicional Six Sigma también puede usar esas entradas, la atención se centra más en la mejora y no de diseño de un nuevo producto o sistema. (Hobbs, D. 2004)

## 10. PROPUESTA DE ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1. GENERALIDADES: PROCESO ENZIMÁTICO LAVADO INDUSTRIAL DENIM
  
2. PROCESO LAVADO INDUSTRIAL: DESARROLLO DE LAS ETAPAS PROCESO DE LAVADO
  - 2.1. Desengomado
    - 2.1.1. Desengome enzimático
    - 2.1.2. Desengome oxidativo
  - 2.2. Abrasión Stonewash
    - 2.2.1. Abrasión mecánica
    - 2.2.2. Abrasión química
    - 2.2.3. Abrasión mixta
    - 2.2.4. Efecto de la temperatura
    - 2.2.5. Efecto del pH

- 2.3. Desactivación
- 2.4. Reducción
- 2.5. Blanqueo
  - 2.5.1. Blanqueo con hipoclorito de sodio
  - 2.5.2. Blanqueo con permanganato de potasio
- 2.6. Neutralizado
- 2.7. Suavizado

### 3. BIOTECNOLOGÍA Y ENZIMAS

- 3.1. Enzimas en la industria textil
  - 3.1.1. Enzima alfaamilasa
  - 3.1.2. Enzima celulasa
  - 3.1.3. Enzima lacasa

### 4. DESING FOR SIX SIGMA (DFSS)

- 4.1. DFSS como un enfoque para diseñar
- 4.2. Distinciones de DMAIC
- 4.3. Similitudes con otros métodos

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

## 11. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño de investigación a realizar será de tipo experimental basado en un enfoque cuantitativo, lo cual se debe a que el propósito del estudio será determinar de forma experimental mediante un ciclo estandarizado de iteraciones, primero a escala laboratorio y luego mediante una serie de iteraciones ejecutadas en ambiente de producción, cual es el efecto de las variables críticas de un proceso enzimático sobre las propiedades físicas (tensión y rasgado) de la fibra de algodón de un *jeans* cuando el mismo es expuesto a un proceso abrasivo (enzimático) durante el proceso de lavado industrial de denim.

Para la consecución del experimento se considerarán como variables independientes: el porcentaje en peso de enzima celulasa, el pH de la solución, la temperatura y el tiempo de proceso, mientras que como variables dependiente será considerada la calidad de la prenda, la cual incluye la apariencia visual (apariencia vintage) – variable cualitativa y las propiedades físicas de la prenda terminada evaluadas en términos de tensión y rasgado – variables cuantitativas. El diseño de investigación se ejecutará en forma de fases y las mismas estarán diseñadas de tal forma que su respectiva realización en el tiempo, permita concretar eficientemente cada uno de los objetivos planteados para la investigación.

En función a lo anterior, se tiene que la interrelación desde la fase 1 hasta la fase 4 que conforman el experimento, se ha diseñado de forma que con la ejecución de dichas fases se logre alcanzar el objetivo general de la investigación, el cual es incrementar sosteniblemente la productividad y rentabilidad de una empresa manufacturera de *jeans*, al implementar la metodología Design For Six Sigma (DFSS) como herramienta de diseño en la formulación de procesos abrasivos enzimáticos durante el lavado industrial de denim, es indispensable determinar como pilar fundamental de la investigación que desde la etapa de investigación y desarrollo, se deben definir los críticos del proceso abrasivo en función a los requerimientos de cada cliente (CTQ's) en particular, lo anterior se debe realizar en función a las propiedades físicas y apariencia visual de la prenda terminada, para ello será preciso que se determine la influencia de cada una de las variables que rigen dicha etapa del proceso enzimático.

Por lo tanto la primera parte de la investigación o fase 1 se centrará en definir mediante una serie de iteraciones experimentales, diferentes formulaciones o condiciones de proceso, cuáles son estas variables críticas para el proceso abrasivo como tal y también permitirá determinar cómo se llevan estas variables a estar bajo control estadístico de proceso; para la determinación experimental de estas variables se contará con el apoyo de los técnicos del área de investigación y desarrollo así como también los técnicos del laboratorio textil de la empresa, la Universidad de San Carlos, el investigador y su respectivo asesor quienes tienen una amplia experiencia sobre el tema investigado.

La fase 1 se desarrollará de tal forma que su finalización permitirá establecer la definición operativa de las variables críticas que definen el proceso abrasivo enzimático, situación que permitirá concretar el objetivo del proyecto de investigación que se centra en describir las variables que la metodología DFSS debe de considerar como críticas durante la etapa de diseño en la formulación del lavado industrial de denim que incluya un proceso de biopulido (abrasión enzimática) como herramienta bioquímica para crear un aspecto vintage sobre la fibra de algodón.

Durante el desarrollo de la fase 2, la técnica que se empleará para recolectar la información requerida, estará basada en la observación, análisis e interpretación de los parámetros físicos de tensión y rasgado (calidad prenda) reportados para las diferentes prendas denim y determinadas mediante pruebas estandarizadas de laboratorio Norma ASTM D5034 y ASTM D1424 respectivamente, ver sección descripción metodológica requerida para la evaluación de pruebas físicas en textiles, según Normas ASTM, para lo cual la toma de muestras se hará a diferentes lapsos de tiempo del proceso de lavado industrial etapa de abrasión enzimática comprendidos dentro de la formulación del proceso enzimático que se esté trabajando.

Para cumplir con el objetivo de la investigación la fase 3, se enfocará en definir la correlación matemática existente entre los parámetros de calidad de la prenda (resistencia a la tensión y rasgado) y cada una de las variables que la metodología DFSS considera como críticas para la formulación del proceso abrasivo enzimático durante el lavado industrial de denim, se realizan diferentes formulaciones organizadas en fases, en las que se variaran las siguientes condiciones de proceso, manteniendo paralelo a ello constantes el resto de variables, es decir que se manipulara cada una de las variables en función al detalle siguiente:

- La concentración de la enzima celulasa, definida en porcentaje en peso, en un rango de 0,1 %, 0,3 %, 0,5 % y 1 % en peso.
- Tiempo del proceso abrasivo, se harán experimentos a: 15, 20, 25 30 y 35 minutos.
- Diferentes temperaturas de proceso: 30, 40, y 50 °C.
- Diferentes pH: 4,5, 5,0 y 6,0.

A lo largo de la fase 3, con cada una de estas condiciones, numeral 1 al 4, se procederá a correr una iteración o carga de prueba, es decir que se realizará una formulación estándar en la que una variable será manipulada mientras que el resto permanecerá constante, el resultado de dicha iteración será monitoreada visualmente para evaluar la apariencia visual de la prenda y luego la prenda muestra será sometida a las pruebas de laboratorio ASTM D5034 y ASTM D1424 para determinar su calidad en función a su capacidad de resistencia a la tensión y rasgado.

Cada proceso enzimático se trabajará empleando la misma materia prima en cuanto a tela (composición 98 % algodón y 2 % espadex) y a la misma no se le realizará ningún desgaste previo (lijado, mercerizado, etc), esto con el objetivo de incrementar la certeza del análisis. Adicional a ello cada experimento se realizará en una máquina lavadora marca Tupesa cuya capacidad es de 100 kg y se partirá de un desengome no enzimático, ya que de esta manera se reducirá las posibles desviaciones que puedan generarse sobre el efecto real de la enzima celulasa sobre la fibra de algodón. Adicional a ello la formulación que se empleará no incluirá ningún paso de oxidación de índigo con hipoclorito de sodio (cloro) ya que este proceso definitivamente si influiría negativamente en el experimento, ya que se ha comprobado previamente que la aplicación de dicho oxidante sí reduce las propiedades de la fibra

considerablemente, lo cual ha sido demostrado ampliamente con otros experimentos.

Para recolectar y correlacionar los datos durante la investigación sobre los que se desarrolla la fase 3, se llevarán registros en una matriz digital (Microsoft Excel), sobre las propiedades físicas de la principal materia prima (tela rígida) que se empleará durante el experimento además de ello tal y como se expuso anteriormente, a lo largo de las diferentes iteraciones experimentales se tomarán muestras (*jeans*) del proceso abrasivo a diferentes tiempos de proceso pero en cada experimento se variarán las condiciones de concentración de enzima celulasa, temperatura y pH de la solución, lo anterior permitirá establecer como cada una de dichas variables influirán tanto sobre la apariencia visual de la prenda en cuanto a desgaste o apariencia vintage, así como también permitirá determinar su influencia sobre las propiedades físicas de la fibra de algodón.

Las pruebas de laboratorio requeridas durante la fase 2, estarán basadas en la Norma ASTM D5034 para análisis de tensión y ASTM D1424 para el análisis de rasgado, los resultados obtenidos servirán para alimentar la matriz electrónica que servirá de base de cálculo para determinar la correlación existente entre las variables independientes y la variable dependiente sobre la que se desarrollará la experimentación de este estudio y en función a ello se estará en la capacidad de estimar la curva que mejor describa dicha correlación entre dichas variables.

Desde ya cabe resaltar que luego de establecer una negociación con la empresa se logró coordinar que los técnicos de laboratorio serían los responsables de la ejecución operativa de las pruebas de laboratorio (tensión y rasgado) y el investigador será el encargado de diseñar la matriz y registrar en

ella los valores puntuales obtenidos con las diferentes corridas y lo más importante será el realizar la interpretación de los resultados que se obtengan con la correlación de dichas variables sobre las propiedades físicas de la fibra de algodón.

Como parte del análisis de información durante la fase 3, se determinará un análisis estadístico confiable (minimización del error) con los resultados de laboratorio que se obtengan de forma experimental, para ello se hará un análisis de varianza unifactorial, con un nivel de significancia de 0,05 correspondiente al efecto de la enzima sobre las propiedades físicas de la fibra de algodón, para dicho cálculo se empleara la herramienta de diseño de experimento del SPC y en función a dicho análisis se pondrá diseñar un modelo, que refleje las condiciones de un proceso bajo control, que permitirá predecir el impacto de cada una de las variables independientes sobre las propiedades físicas de la fibra de algodón y en función a ello, se podrá diagramar la ruta de crítica del proceso abrasivo, el cual es el primer paso para la implementación de la metodología de Desing For Six Sigma en la formulación del proceso enzimático.

El diseñar un proceso manufacturable y reproducible (proceso bajo control) le permitirá a la empresa fortalecer su ventaja competitiva, la cual se interpreta como la penetración en el mercado internacional de denim con productos masivos *fashion* e innovador al menor tiempo posible, y a la vez le permitirá incrementar su eficiencia operativa, ya que el nivel de rechazos (reproceso) y de producto defectuoso se reducirá drásticamente en un 80 % con respecto al año anterior en curso (2013), situación que actualmente se traduce en la pérdida en ventas de \$ 50 000 semanales, dicha pérdida es generada por producir involuntariamente producto denim que no cumple especificaciones en términos de tensión y rasgado.

Los resultados del experimento obtenidos con la ejecución de la fase 3 estarán determinados mediante un muestreo probabilístico estratificado, por lo cual todos los *jeans* (100 prendas en total por carga) que se trabajarán por carga de lavado, tendrán la misma probabilidad de ser seleccionados como muestra a evaluar y la selección se hará de forma mecánica al final del período de tiempo que se estipule como óptimo para cada fase del experimento.

Para el cálculo del tamaño de la muestra se asumirán las siguientes condiciones claves:

- Tamaño del universo: 160 000 unidades
- Tamaño muestra: a definir según el diseño de experimentos del SPC, el cual define las muestras y las iteraciones en función a las variables Independientes.
- Error máximo aceptable medición: 5 %
- Porcentaje estimado de la muestra: 50 %, lo cual se justifica en el hecho de que no se tienen marcos de muestreo previos.
- Nivel deseado de confianza: 95 %

Con estos valores se ejecutara la fase 4, del experimento y la misma se centrará en la herramienta de diseño de experimentos dado por el SPC, esto servirá para determinar el tamaño óptimo de la muestra, y en función a este último se determinará la totalidad de iteraciones experimentales que se necesitan correr para que la fase experimental alcance el 95 % de nivel de confianza deseado, para ello hay que considerar desde ya que el número de iteraciones estará en función a la variables independientes que se definieron desde un principio las cuales son: porcentaje en peso de enzima, temperatura de proceso y pH de la mezcla en al cual se realiza el proceso enzimático.

- Descripción metodológica requerida para la evaluación de pruebas físicas en textiles, según Normas ASTM.
  - Resistencia al rasgado
    - Alcance: cubre un procedimiento para la determinación del promedio de la fuerza requerida, para ocasionar un rasgado sencillo, tipo lengüeta, que empieza desde un corte en el tejido de la tela, por medio de un péndulo que baja (Elmendorf).
    - Aparatos
      - ✓ Tipo de péndulo que baja (Elmendorf)
      - ✓ Pesos de calibración.
      - ✓ Moldes de corte y tijeras.
      - ✓ Regulador de presión de aire, capaz de controlar entradas de 60 psi o 90 psi (410 kpa y 620 kpa), para mordazas neumáticas.
    - Preparación del espécimen
      - ✓ Cortar 3 especímenes en cada dirección, usando la plantilla de dimensiones requeridas y una cuchilla.
      - ✓ Colocar el corte de urdimbre con la orientación del lado más corto del espécimen a los hilos de trama, de manera que sean aquéllos los rasgados y no estos.
      - ✓ La dimensión crítica de la prueba del espécimen es la distancia 43 +/- 0,15 mm., el cual será rasgado durante la prueba.

- Preparación del aparato
  - ✓ a. Seleccionar la capacidad, de manera que los especímenes se rasguen entre 40% al 80% de la escala del valor.
  - ✓ b. Examinar la orilla del cuchillo para filo, centrar alineamiento y usar, como es dirigido en los procedimientos de calibración.
  - ✓ c. Para las mordazas neumáticas se coloca la presión del regulador de aire entre 60 a 80 psi. (410 kpa a 550 kpa).
  
- Procedimientos
  - ✓ Acondicionar todos los especímenes por un periodo apropiado, en función de los contenidos de la fibra en las muestras.
  - ✓ Subir el péndulo a la posición inicial y colocar el apuntador contra su propia parada (cuando se esté operando sin un sistema de grabado digital).
  - ✓ Sujetar el espécimen acondicionado y asegurarlo en las mordazas, de tal forma que esté bien centrado en la orilla inferior, cuidadosamente colocada contra las paredes, de manera que la orilla superior esté paralela a las mismas y observar que el ancho del hilo esté exactamente perpendicular a las mordazas.
  - ✓ Si los especímenes son cortados con patrón y con Tijeras, empujar la palanca de la cuchilla, se produce un corte de 20 +/- 0,15 mm. y se extiende hacia arriba de la orilla inferior y deja un balance en la tela

de 43.0 +/- 0,15 mm., donde debe permanecer el rasgado.

- ✓ Oprímase el botón liberador del péndulo hasta donde llegue, luego se suelta y así en el balance de regreso se sujeta con la mano, sin perturbar la posición del indicador.
- ✓ Leer la escala, en donde la aguja indicadora esté lo más cerca de la siguiente división.
- ✓ Las lecturas se pueden rechazar cuando el espécimen se resbala, en las mordazas o donde el rasgado se desvía más de 6 mm, lejos de la proyección del corte original.

- Reporte

- ✓ Reportar el promedio de la fuerza en gramos (o en libras fuerza), que son necesarios para rasgar el espécimen en cada dirección.

- Determinación de la resistencia a la tensión

- Alcance: para determinar la fuerza eficaz de la tela en uso, que es la fuerza de los hilos en un ancho específico, junto con la fuerza adicional contribuida por hilos adyacentes.

- Aparato

- CRE Modelo de Mesa Instron 4411, basado en el puesto de control microprocesado (Dinamómetro Instron Modelo 1130

o similar), con velocidad de cruce de cabeza de 12 +/- 0,5 plg/min. (305 +/- 10 mm/min).

- CRT Modelo Scott J con velocidad de cruce de cabeza de 12 + 0,5 plg/min. (305 + 10 mm/min).

Ambos aparatos están con A-420 sujetadores neumáticos con 3" x 1" (76,2 mm x 25,4 mm) mordaza de metal en trasera y 1" x 1" (25,4 mm x 25,4 mm), mordaza de caucho en la delantera. Otra combinación de 1" (25,4 mm), al ancho de las mordazas de caucho, puede utilizarse, que permite un desprendimiento mínimo (disminuir resbalamiento) del espécimen.

- Preparación del espécimen

Tres especímenes son preparados para la dirección completa y torcida (trama y urdimbre). Se corta cada espécimen de 100mm + 1mm (4" +/- 0.05") de ancho y por lo menos 150 mm (6") de largo, con la dimensión paralela larga a la dirección, por la cual la carga es requerida. Dibujar una línea 37 mm +/- 1 mm (1,5"/-0,02") desde la orilla de espécimen, paralelo a la dirección de la prueba usada para centrar el espécimen en los sujetadores. No hay que cortar dos especímenes paralelos; no debe de cortarse a la orilla ni deben contener el mismo grupo de hilos en urdimbre y trama. Las muestras deben de tomarse, por lo menos, a un décimo del ancho de la tela. En lugar de cortar tres especímenes simples, en cada dirección, un espécimen continuo de 300 mm (12") de un mínimo de 150 mm (6"), en cada dirección, puede ser cortado.

- Procedimiento
  - ✓ a. Se deben de acondicionar todos los especímenes de prueba, por un periodo apropiado, en función los contenidos de la fibra de la muestra.
  - ✓ b. Preparar los aparatos. Verificar el punto cero de la escala, antes de cada serie de prueba. Verificar la distancia entre los sujetadores en el inicio del set de prueba en  $76 + 1\text{mm}$  ( $3+.005$ ). Para el usuario de Instron 4411 o un modelo similar, hay que seguir las instrucciones en el manual.
  - ✓ c. Seleccionar un rango de carga de la máquina de prueba, de manera que el quiebre ocurra entre 10 % y 90 % de la escala completa de carga.
  - ✓ d. Insertar el espécimen de prueba en las mordazas, de manera que la línea dibujada en la muestra esté paralela con la dirección de la prueba, que está adyacente al costado de la mandíbula superior e inferior.
  - ✓ e. Operar la máquina y leer la carga de ruptura. Si el espécimen se resbala, se rompe, o si el resultado está notablemente debajo del promedio, para el set de especímenes, se desecha el resultado y se toma otro espécimen.
  - ✓ f. El criterio para una ruptura en la mordaza es algún quiebre ocurrido dentro de 5 mm (0,25) de la mandíbula, la cual resulta en un valor debajo del 50 % del promedio de todos los otros quiebres.

- Reporte
  - Reportar el promedio de los tres especímenes, en cada dirección (trama y urdimbre), y redondear a la unidad de libra más cercana.



## 12. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo del experimento se utilizarán las siguientes técnicas estadísticas:

### 12.1. Estadística descriptiva

Esta etapa ayudará a recolectar, presentar, describir, analizar e interpretar la recolección de datos, esencialmente se agruparán los datos con dos medidas descriptivas que a continuación se detallan y que permiten caracterizar la totalidad de dichos datos:

- **Media:** siendo esta una medida de tendencia central, permitirá establecer la relación de un dato con los otros obtenidos como resultado de las pruebas de laboratorio.
- **Desviación estándar:** esta medida servirá para describir cuanto se apartan los datos de la medias, en otras palabras representa la distribución de cada elemento individual que es afecta por el valor de cada observación, para determinar si los datos están distribuidos normalmente en 1sigma (68,27 %), 2sigmas (95,43 %), 3 sigmas (99,73 %)

## **12.2. Gráficos descriptivos**

- Histograma: este gráfico se utilizará para obtener una mejor visión e interpretación de todos los datos recolectados al final de las pruebas de laboratorio.

## **12.3. Estadística inferencial**

Con este análisis se logrará establecer las generalizaciones acerca de las propiedades de la población partiendo de lo específico, las cuales llevan implícitos una serie de riesgos. Para que estas generalizaciones sean válidas la muestra debe ser representativa de la población, y la calidad de la información debe ser controlada; además puesto que las conclusiones extraídas están sujetas a errores, se tendrá que especificar el riesgo o probabilidad con que se pueden cometer estos errores.

## **12.4. Diseño experimental**

Bajo esta técnica se identificará y cuantificará las causas de un efecto dentro del presente estudio, para ello se manipularan deliberadamente las variables que influyen en el proceso enzimático: temperatura, (Porcentaje) en peso de la enzima, tiempo proceso, y pH de la solución, vinculadas a la causa, y de esta forma medir el efecto que producen dichas variables sobre la calidad de la prenda definida en función a las propiedades físicas de resistencia a la tensión y al rasgado. Lo anterior permitirá preescribir una serie de pautas relativas para definir qué variable se debe y de qué en que parámetros o proporción, así como cuántas veces hay que repetir el experimento y en qué orden para poder establecer el grado de confianza predefinido en la relación causa-efecto.

### **12.5. Selección de muestreo estadístico**

Esta herramienta se utilizará para la selección idónea de la muestra a partir del diseño experimental.

### **12.6. Prueba de hipótesis**

Se utilizará para juzgar si una propiedad que se supone en una población estadística es compatible con lo observado en la muestra de dicha población, tras aplicar el problema estadístico a cierto número de experimentos, en los que se puede obtener error tipo I (suceso falso y es verdadero) o error tipo II (suceso verdadero y es falso).

### **12.7. Probabilidad**

Se utilizará para especificar el error de las pruebas tanto experimentales como de laboratorio.

### **12.8. Series de tiempo**

Se utilizarán para controlar la información a través del tiempo. Y si existe algún dato fuera de control estadístico se estará en condiciones de identificar la causa justo en el momento exacto en el que ha ocurrido la no conformidad durante el proceso, el cual se estará desarrollando de forma experimental.



## 13. CRONOGRAMA

- Facilidad

El estudio se realizará en el área de investigación y desarrollo de la empresa manufacturera de *jeans*, la cual se ubica físicamente en la zona 7 ciudad capital de Guatemala y para desarrollar el mismo se contará con la autorización de la Alta Gerencia, por lo que la fase experimental se realizará empleando el equipo (lavado y de laboratorio), insumos y personal técnico involucrado tanto en el área de desarrollo de lavado como en laboratorio textil con el que la empresa ya cuenta, a pesar de contar con esta autorización y el acceso necesario para concretar el análisis, se ha estimado para completar la investigación un período aproximado de 15 meses.

Para desarrollar la parte experimental del estudio tal y como ya se mencionó en el párrafo anterior, se hará uso del recurso de la empresa en cuanto a materiales (tela e insumos para lavado), equipo de lavado industrial y equipo de laboratorio, se ha planificado que las diferentes pruebas se corran a escala laboratorio y posterior a ello se ejecuten las pruebas en ambiente producción, dejando constante las variables de: tiempo, porcentaje en peso de enzima celulasa y temperatura, lo anterior implica que la supervisión en cada una de las iteraciones que conforman el experimento será clave para validar que las condiciones definidas previamente se cumplan, de esta forma se ha definido que los experimentos solo se podrán ejecutar de lunes a viernes en horarios de 07:00 a 18:00 horas.

En función a ello se estima que la parte experimental estará completada en 8 meses calendario, a partir del momento en que se tenga acceso a la materia prima. Si a lo anterior se le adiciona el tiempo necesario para fundamentar el estudio y para extraer las conclusiones que puedan generarse de la interpretación y correlación de los resultados de laboratorio obtenidos con la metodología de laboratorio de las Normas ASTM, se estima que el tiempo total requerido para la consecución del estudio será de aproximadamente 15 meses.

En función a la anterior desde ya se define como accesible a mediano plazo la consecución del estudio y se ven a grandes rasgos los aportes que el mismo puede generar en la categoría de denim en la industria textil al reducirse las unidades no concretadas por no cumplir con la especificación de tensión y rasgado, lo cual representa una pérdida en ventas semanal de \$50 000.00. Para la consecución del experimento se considera la cuantificación de la siguiente inversión:

Tabla I. **Cuantificación de la Inversión**

<b>Rubro</b>	<b>Monto (Q)</b>
1. Materia prima tela, insumo primario	20 520
2. Químicos e insumos generales	12 000
3. Tiempo de máquina lavadoras	3 200
4. Costo de la mano obra técnicos de confección prendas	1 200
5. Mano obra técnicos lavado	1 500
6. Mano obra técnicos laboratorio	1 500
7. Equipo de laboratorio, pruebas ASTM	1 600
8. Certificación de las pruebas mediante metodología ASTM	1 200
9. Asesoría profesional de la investigación	3 500
10. Tiempo dedicado por parte del investigador	8 000
<b>Total</b>	<b>57 220</b>

Fuente: elaboración propia.

Además, como recurso humano y recurso físico e insumos se considera necesario contar con la siguiente distribución:

**Tabla II. Recurso humano requerido**

Requerimiento humano	Total recurso
Técnico de lavado	1
Técnico de laboratorio textil	2
Asesor de la investigación	1
Coach de la investigación, interno a la empresa	1
Tesista nivel maestría	1
<b>Total</b>	<b>6</b>

Fuente: elaboración propia.

**Tabla III. Recurso físico e insumos requeridos**

Requerimiento	Total
Lavadora Tupesa T-75	1
Lavadora Tupesa T-360	1
Jeans confeccionados en tela de composición 98% algodón y 2 % spandex	2 200 unidades
Enzima celusasa	1 kg
Medidor de tensión y rasgado (instrumentos de laboratorio) Scott tester (tensión) y Heavy duty elemendorf (rasgado)	2 unidad
Computadora, para recolectar y analizar información	1 unidad

Fuente: elaboración propia.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AATCC. (2001). Value added innovations in garment wet processing technology. Simposium, AATCC, USA, Atlanta.
2. C. Bauab y Asistencia Técnica, V. T. (2010). Como utilizar los tejidos vicunha en su confección. Brasil, Brasil: Vicunha Nordeste S. A.
3. Caceres, G. A. (1999). Condiciones Óptimas para la Aplicación de Enzimas en los Procesos de Lavado y Acabados Especiales. Guatemala. Guatemala: URL, Universidad Rafael Landívar.
4. Corporation, W. B. (n.d.). Worthington Enzyme manual. Retrieved julio 15, 2013, from Worthington Biochemical Corporation: [www.worthingtonbiochem.com](http://www.worthingtonbiochem.com)
5. Dennis, P. (2002). Lean Production simplified: A Plain-Language Guide to the World's Most Powerful System. Estados Unidos, Estados Unidos: Productivity Press.
6. Herrera, J. R. (2005). EL EFECTO DE LA ENZIMA LACASA EN LA REDUCCIÓN DEL ÍNDIGO DURANTE EL LAVADO INDUSTRIAL DE PANTALONES DE LONA (MEZCLILLA). Guatemala: USAC, Universidad San Carlos de Guatemala.

7. Hobbs, D. (2004). Lean Manufacturing Implementation: A Complete Execution Manual for aAny Size Manufacturer (II edición ed., Vol. I). Estados Unidos, Estados Unidos: Ross Publishing Incorporation.
8. Hollen, N., Saddler, J., & Langford, A. L. (1997). Introducción a los Textiles (Cuarta ed.). México DF: Limusa.
9. Horbal, R. R. (2008). "Implementing Lean Manufacturing in High-mix Production Environment" (Vol. 257). Boston, Boston, Estados Unidos: IFIP International Federation for Information Processing.
10. Kirk, R. E. (1962). Enzimas Industriales. Enciclopedia de tecnología Química (1 ed.). México DF: Union Tipográfica Editorial Hispano americano.
11. Kirk, R. E. (1962). Enzimas y Enzimología. Enciclopedia (1 en español ed., Vol. VI). Ciudad de México: Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana (UTEHA).
12. Mendez, R. (1999). Estudio comparativo en la aplicación de celulasas ácida y neutra, en el paso de abrasión en un proceso de lavado industrial a pantalones de mezclilla con piedra pómez. (tesis Ing. Químico. Guatemala:. Universidad de San Carlos, Guatemala. Guatemala: Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería.
13. Mills, C. (2004). A special educational suplement lesson 1. USA: Denim Colleague Cone Mills.

14. Montega. (2013). Fundamentals of enzymes. Retrieved Mayo 10, 2013, from Fundamentals of enzymes.: [www.montegauno.com/enzymes.htm](http://www.montegauno.com/enzymes.htm)
15. Olsen, H. S. (2000). Enzymes at work (Tercera Edición ed.). Dinamarca, Dinamarca: Denmark: Novo Nordisk.
16. Olson, L. A., & Stanley, P. M. (2005). Compositions and methods that introduce variations in color density into cellulosic fabrics, particularly indigo dyed denim (segunda ed.). Portland: McGraw-Hill, Inc.
17. Penet, C. S. (1991). New Applications of Industrial Food Enzymology: Economics and Processes (Cuarta ed., Vol. VI). Chicago, Illinois, USA: Institute of Food Technologists.
18. Shingo, S. (1989). A study of the Toyota Production System from an industrial engineering viewpoint (III edición ed.). Estados Unidos, Estados Unidos: Productivity Inc.

