

## REDUCCIÓN DE DEFECTOS EN EL PROCESO DE SOLDADURA POR OLA DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

**Marvin Gerardo Lara Fúnez**

**Ana Maritza Lanza Ríos**

Maestranteros

**Juan Jacobo Paredes Heller\***

**Eduardo Valle**

Profesores, Departamento Postgrado, UNITEC, San Pedro Sula, Honduras

(Agosto, 2012)

**Resumen.** TRC Honduras es una empresa que fabrica dispositivos electrónicos que previenen electrochoques e incendios. Debido a esto ha establecido un nivel mínimo de rendimiento de calidad de 96% en cada uno de sus procesos. Sin embargo, los antecedentes indican que éste es de solamente 94.3% en el proceso de soldadura por ola de las tarjetas de circuito 53064, por lo que necesita mejorar y así reducir los defectos y costo de reparación de los mismos. Mediante la manipulación de variables de máquina, de proceso, materia prima y métodos, con un análisis de datos con la ayuda de Minitab basado en la metodología de DMAMC de seis sigma, se obtuvieron los parámetros recomendados para la reducción de defectos en el proceso de soldadura por ola. Modificando el proceso se obtuvo un rendimiento de 98.1% en el proceso de soldadura por ola y una reducción del 15% en el costo de reparación. Se recomienda implementar el plan de acción propuesto en esta tesis para el control de las mejoras alcanzadas.

**Abstract.** TCR Honduras is a company that manufactures electronic devices that help prevent electroshock and fires. Because of this, the company has established a minimum level of quality performance of 96% in each one of its manufacturing processes. However, the records show that the wave soldering process of the circuit board 53064 has a 94% minimum level of quality performance. Therefore, it needs improvement to reduce defects and repair costs. The Six Sigma DMAIC methodology was used along with Minitab software to help obtain the values resulting in the recommended parameters to reduce the defects in the wave soldering process. Through changes made on machine variables, raw material and by modifying the process it was possible to get a 98.1 % quality performance in the wave Soldering process and to get a reduction of 15% in the repair costs. It is recommended to implement the proposed action plan presented on this thesis to control the achieved improvement.

**Palabras claves:** Defecto de soldadura por ola, metodología DMAMC, nivel de rendimiento de calidad, proceso y tarjeta de circuito 53064.

[\\*JACOBO.PAREDES.HELLER@UNITEC.EDU](mailto:JACOBO.PAREDES.HELLER@UNITEC.EDU)

## INTRODUCCIÓN

La finalidad de cualquier empresa es ser rentable y en el caso de las maquiladoras esto no es una excepción. Una de las maneras de lograr la rentabilidad es manteniendo un alto nivel de productividad con un nivel mínimo aceptable de defectos, en otras palabras siendo eficaces a través de procesos eficientes. TRC<sup>2</sup> Honduras S.A., es una empresa dedicada al proceso de manufactura de equipo electrónico que previene incendios en las residencias y protege a las personas de electrochoques. Fue fundada en 1997 en la ciudad de San Pedro Sula, cuenta con tecnología de punta que es utilizada en sus procesos de moldeo de plástico por inyección, embobinado de alambres magnéticos, montaje, soldadura de tarjetas de circuito, preparación de cables, conectores, ensamble final y pruebas eléctricas de los dispositivos.

Para mantener un nivel de calidad mínimo aceptable la empresa ha implementado la norma ISO9001:2008 para gestionar sus procesos. También ha aplicado las herramientas de manufactura esbelta para mejorar muchos de sus procesos, reduciendo el tamaño de sus líneas de producción y disminuyendo el WIP<sup>3</sup> gracias al involucramiento de equipos multiniveles de mejora. No sucede lo mismo con la metodología Seis Sigma con la cual solo han comenzado a medir pero no se ha implementado una mejora completa usando el DMAMC. El departamento de calidad de TRC Honduras ha establecido un valor de rendimiento de calidad de 96% como meta para cada uno de los procesos de fabricación. En el caso de los procesos antes mencionados, uno de los puntos críticos es el de soldadura de los componentes electrónicos a la tarjeta de circuito, ésto es porque un defecto en un punto de soldadura hace que el circuito no funcione correctamente. Este malfuncionamiento puede o no ser detectado en procesos posteriores por esto es que se considera como crítico ya que podría llegar así al cliente.

Los defectos en las tarjetas de circuito han generado mal funcionamiento del producto en operaciones posteriores. Únicamente el mes de mayo 2011 alcanzó el nivel de rendimiento meta del 96%, según lo tiene establecido TRC Honduras. El rendimiento de calidad en un proceso se mide dividiendo la cantidad de piezas conforme con las especificaciones entre la cantidad total de piezas producidas, el

---

<sup>2</sup> Technology Research Corporation.

<sup>3</sup> Son las siglas de "Work in Process" que significa trabajo en proceso, son los materiales en estado de procesamiento por lo que no se consideran como inventario y pertenecen a las líneas de producción.

resultado se presenta en términos de porcentaje. Al realizar el planteamiento del problema de la investigación se determinó como objetivo general del proyecto: “Establecer un nivel de rendimiento de calidad del 96 % en el proceso de soldadura por ola de TRC Honduras usando la metodología DMAMC de Seis Sigma”. La empresa ha asignado personal, equipo e insumos para reparar los defectos de soldadura no solo al área de retoque sino también al área de ensamble final debido a los defectos que no lograron ser reparados al inicio. En este caso el costo de reparación es mayor ya que se tiene que desensamblar el producto para poder llegar a la tarjeta de circuito y luego volver a ensamblarlo y probarlo eléctricamente.

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

TRC Honduras es una maquila de productos electrónicos considerada por el BCH como parte de la industria de bienes para la transformación (Banco Central de Honduras, 2009-2010). Se destaca principalmente en el ensamble y empaque de controles eléctricos y aparatos de seguridad para la protección de costosos equipos electrónicos, previniendo los incendios, electrocuciones y cualquier lesión grave causada por choques eléctricos, en el hogar y lugar de trabajo ofreciendo productos inteligentes de las marcas: “Shock Shield, Fire Shield y Electra Shield”, entre algunos, que pueden prevenir accidentes, proteger la propiedad y algo más importante, salvar vidas (Technology Research Corporation, 2011).

TRC Honduras es una subsidiaria 100% de la empresa Technology Research Corporation, establecida en Clearwater, Florida desde 1981. TRC Clearwater funciona como centro de distribución de los productos con destino a los distintos usuarios finales alrededor del mundo y se convierte a la vez en nuestro principal cliente. TRC Honduras fue diseñada y construida como centro de manufactura con alto nivel tecnológico, combinando el bajo costo de mano de obra con la automatización de avanzada tecnología e integración vertical (Op. Cit.).

En mayo de 2011, TRC fue adquirida por Coleman Cable, Inc., Waukegan, IL, (Nasdaq: CCIX), un fabricante líder e innovador de cables eléctricos y electrónicos y cables para la seguridad, sonido, telecomunicaciones, eléctrico, comercial, sectores industriales y de automoción. TRC Honduras tiene la capacidad de suministrar servicios y productos de la más alta calidad, la ubicación en Honduras brinda ventajas logísticas significativas sobre otros países, esta proximidad reduce el tiempo de envío asegurando las entregas a tiempo, el bajo costo de mano de obra, integración vertical, moldeado de plásticos, embobinado de transformadores, montaje de circuitos impresos, ensamble de componentes, sub-ensamble de

módulos, armado y prueba de productos terminados y conexión de cables, todo en una sola ubicación (Op. Cit.).

La planta de fabricación incorpora un Sistema de Gestión de la Calidad (SGC), que permite producir productos con niveles de defectos sumamente bajos, formada por los Departamentos de Contabilidad, Recursos Humanos, Producción, Calidad, Mantenimiento, Servicio al Cliente y Compra (Departamento de Recursos Humanos de TRC Honduras, 2011).

TRC de Honduras obtuvo la certificación en la Norma ISO9002: 1994 en Septiembre 25 de 1998, base fundamental para la transición a la nueva revisión de la Norma ISO9001: 2000 y de igual forma la aprobación de los Underwriter Laboratories (UL), la Canadian Standard Association (CSA) y de la Institución Alemana de Pruebas y Certificación (VDE). Además TRC Honduras ha aprobado el difícil examen de control de calidad de XEROX (Technology Research Corporation, 2011).

En la actualidad se cuenta con personal altamente calificado encaminado hacia el desarrollo y funcionamiento del SGC, logrando una mayor satisfacción del cliente y el mejoramiento continuo de nuestros procesos (Op. cit).

## **METODOLOGÍA**

El diseño de la investigación fue mixto para probar la hipótesis nula “Aplicando la metodología DMAMC de Seis Sigma se logra un rendimiento menor a 96% en el proceso de soldadura por ola en TRC Honduras”. En la parte cuantitativa, se aplica un análisis estadístico de los datos numéricos obtenidos del proceso para luego diseñar experimentos que midan las variables que contribuyen a la reducción de defectos en el proceso de soldadura por ola. Los experimentos son situaciones de control en la cual se manipulan, de manera intencional, una o más variables independientes (causas) para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efectos) (Hernández, Fernández, & Lucio, 2006). Los diagramas de flujo de proceso presentan gráficamente un proceso o sistema utilizando cuadros y líneas interconectadas. Son sencillos, pero excelentes cuando se busca explicar un proceso o se pretende que tenga sentido (Heizer & Render, 2009).

Los diseños correlacionales describen relaciones entre dos o más categorías, conceptos o variables en un momento determinado, ya sea en términos correlacionales, o en función de la relación causa-efecto (Hernández, Fernández, & Lucio, 2006). Las evaluaciones del antes y después de los experimentos

representan el análisis de la influencia de las variables en la generación de los defectos en el proceso de soldadura por ola. En el estudio cualitativo se toma en cuenta a los informantes estratégicos usando observaciones cualitativas, entrevistas focalizadas y grupos multiniveles de discusión. La población objetivo es el conjunto de todos los individuos que poseen en común una o varias características y hacen parte de un estudio o de una experiencia. (Gómez, 2009). En base a esta definición la población objetivo de esta tesis son todas las tarjetas de circuito que se sueldan por el proceso de soldadura por ola en TRC Honduras.

La muestra debe ser un grupo representativo de elementos de una población más amplia (Gómez, 2009). Habiendo definido a la población objetivo se calcula el tamaño de la muestra dando como resultado 108 tarjetas de circuito diarias, por un período de dos semanas previo a la aplicación de Seis Sigma y se vuelve a tomar un período similar para el análisis después de la mejora.

Existen varias técnicas que sirven para la obtención y análisis de datos tanto para el enfoque cuantitativo como para el cualitativo. La entrevista a expertos y la técnica de grupo nominal brindarán la información cualitativa que ayudará a dar soporte al análisis cuantitativo. La metodología DMAMC de Seis Sigma es una técnica que está diseñada para definir, medir, analizar, mejorar y controlar los procesos y utiliza métodos estadísticos para datos tanto cuantitativos como cualitativos, por lo que se usará la misma para ambos enfoques de esta investigación.

Para realizar el análisis de las mediciones se eligió al software de estadística Minitab ya que TRC cuenta con una licencia para el uso de la misma. Con esta herramienta es posible realizar estadísticas descriptivas, pruebas de hipótesis, intervalos de confianza y pruebas de normalidad. Además sirve para descubrir las relaciones entre variables e identificar los factores que afectan la calidad del producto (Minitab, 2011). Para este proyecto el Minitab es especialmente útil ya que se puede realizar un diseño de experimentos para encontrar los valores de configuración que optimicen el proceso de soldadura. Es posible utilizar diseños factoriales, de superficie de respuesta y Taguchi (Op. Cit.).

## **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

El proceso de soldadura por ola no tiene el rendimiento esperado de 96%, como se explicó en la introducción. Actualmente éste es de 94.3%. El problema de los defectos de soldadura se detecta en la operación posterior de reparación de tarjetas y también en las pruebas eléctricas que se realizan posteriormente. Estos defectos hacen que la tarjeta de circuito falle las pruebas eléctricas, teniendo

entonces que diagnosticar la causa y proceder a la reparación de las mismas. Lo que se busca con la implementación del DMAMC de Seis sigma es reducir los defectos de soldadura y poder mantener un nivel de rendimiento de calidad de al menos 96%. Esto representa una mejora de 40,000 defectivos por millón de oportunidades

## **PRIMRA ETAPA DMAMC: DEFINIR**

El primer paso del DMAMC es Definir el equipo de trabajo, los requerimientos del cliente y el proceso actual. Se conformó un equipo de trabajo que incluye a operarios de la máquina que son considerados como los expertos del proceso. También se invitó al ingeniero, al supervisor y al mecánico del área como informantes estratégicos.

El proceso de manufactura consta de actividades realizadas por los operarios técnicos de la máquina y que están relacionadas con las actividades de otras áreas de ensamble.

Las áreas de ensamble involucradas en el proceso de soldadura por ola son:

1. Stuffing
2. Soldadura por ola
3. Sub ensamble

El proceso de soldadura por ola no recibe materiales directamente de almacén. En cambio, la materia prima de este proceso es la tarjeta de circuito impresa con los componentes montados provenientes del área de “Stuffing”, que tiene tres líneas de manufactura capaces de producir cualquiera de los modelos de tarjeta de circuito. En promedio, sólo una de ellas es utilizada para la tarjeta 53064, las otras dos líneas son usadas para el resto de los modelos.

La línea de manufactura de la tarjeta 53064 cuenta con cinco operarios que trabajan de manera secuencial. El montaje inicia colocando la tarjeta de circuito impresa sobre un tablero de aluminio que es usado para montar el ensamble en la cadena transportadora de la máquina. Luego, se montan los componentes electrónicos sobre la tarjeta impresa, siguiendo las instrucciones y ayudas visuales provistas por el departamento de ingeniería. Una vez montados los componentes electrónicos sobre la tarjeta impresa se entrega a los operarios técnicos de la máquina soldadora de ola.

El área de soldadura por ola cuenta con una máquina activa que es la que realiza el proceso. La carga y descarga de tarjetas de circuito a la máquina es realizada por dos operarios técnicos que se encuentran permanentemente en dicha área. Sin embargo, existen dos operarios técnicos más que han sido entrenados para realizar esta operación. Otras de las funciones de los operarios técnicos de soldadura por ola es preparar la máquina de soldadura antes que inicie el día. Estos piden al departamento de suministros los químicos flux y *thinner*, además del estaño que requiere la máquina para trabajar durante el día.



**Figura 1: Vista del proceso**

Posteriormente, configuran los parámetros de temperatura y velocidad con que la máquina soldará las tarjetas. Uno de los operarios técnicos permanentes se encarga de tomar los tableros con las tarjetas ensambladas de la línea de Stuffing. Se colocan unas pesas sobre los componentes para evitar que se levanten durante el baño de soldadura. Luego las monta sobre la cadena transportadora de la máquina. Una vez dentro de la máquina, la cadena transportadora lleva a la tarjeta por sobre el siguiente proceso (Indium Corporation, 2011):

1. Baño de la mezcla de flux y *thinner*. Éste es un estándar de los procesos de soldadura por ola. Es importante porque sirve para mejorar el desempeño de la soldadura.
2. Pre calentamiento: En esta etapa el flux se seca y se activa, además de calentar la tarjeta para aumentar la velocidad de producción y de reducir el choque térmico de la tarjeta y los componentes electrónicos.
3. Soldadura por ola de componentes: Esta es la parte más importante pues es en la que se funde el estaño para aplicar la aleación de estaño/plomo a los contactos y terminales de componentes y obtener así una soldadura robusta.

4. Inspección: El segundo operario técnico de la máquina se encarga de sacar el tablero y la tarjeta soldada de la cadena transportadora. Inmediatamente revisa de manera general la calidad de la soldadura y cambia los parámetros de la máquina de ser necesario.
5. Enfriamiento: Una vez soldada la tarjeta debe enfriarse para poder ser procesada en operaciones posteriores.

Una vez soldada, la tarjeta se entrega al área de sub ensamble. La operación de sub ensamble directamente relacionada con la soldadura por ola es la de reparaciones de las tarjetas electrónicas, que es donde se corrigen los defectos de soldadura.



**Figura 2: Inspección de las tarjetas.**

### ***Características de Calidad***

El equipo de trabajo conformado para este proyecto realizó una investigación en base al conteo de defectos en un período de 11 días y elaboró un diagrama de Pareto. Se observa que casi el 64% de las tarjetas defectuosas está relacionado con soldadura insuficiente en la tarjeta de circuito soldada.

### ***Diagrama de alto nivel SIPOC***

SIPOC es un diagrama cuyo nombre proviene de sus siglas en inglés que en español se traduce como proveedores para el proceso, entradas al proceso, procesos que se requiere mejorar, salidas del proceso y clientes que reciben el producto (Escuela Internacional de Negocios, 2010, pág. 24). El equipo



conformado en TRC Honduras para este proyecto ayudó en la elaboración del diagrama SIPOC para ilustrar el proceso de soldadura desde los proveedores hasta el cliente interno.

Se observa cada una de las entradas y salidas que están relacionadas con el proceso de soldadura por ola. Este ayuda a tener una mejor comprensión de los factores involucrados en el proceso.

## **SEGUNDA ETAPA DMAMC: MEDIR**

El mapa detallado del proceso busca oportunidades para (Escuela Internacional de Negocios, 2010):

1. Eliminar pasos
2. Hacer pasos más rápidos
3. Hacer pasos en paralelo
4. Reacomodar pasos
5. Simplificar pasos

Este diagrama de flujo o mapa detallado servirá para análisis posteriores. En el mismo se muestra las diferentes variables que influyen en el proceso de soldadura por ola como ser: la materia prima que se utiliza, los parámetros de control que se ingresa a la máquina y la participación del recurso humano en dicho proceso.

### ***Evaluación del sistema de medición***

Este sirve para evaluar qué tan bueno es nuestro sistema de medición. Se opta por un estudio de repetitividad y reproducibilidad (R&R) mediante un análisis de datos por atributos. Los resultados muestran que Dania y Carlos tuvieron calificaciones de 100% y 90% en repetitividad respectivamente y la reproducibilidad del sistema es de un 90%. Se busca tener al menos un 90% R&R (Escuela Internacional de Negocios, 2010) por lo que se procede a utilizar a estos dos empleados para el conteo de defectos.

### ***Medición de la capacidad actual del proceso***

La variable dependiente a medir es la soldadura insuficiente en la tarjeta de circuito 53064. Se elige este tipo de defecto por lo determinado en el Pareto, es decir, que ésta causa representa cerca del 64% de todos los defectos. Se trabaja

sólo con el modelo 53064 ya que éste modelo representa el 46% de los que se procesan en el área de soldadura por ola.

Se midió la cantidad de defectos de dos semanas de producción según el cálculo de la muestra. Los datos tomados no son de variable sino de atributo por ser un conteo de bueno/malo, es por eso que no es necesario realizar una prueba de normalidad para poder tratar los datos estadísticamente (Minitab, 2011).

Ya que los datos son de tipo atributo, se usa un análisis de Poisson de capacidad de proceso. El Minitab da cuatro tipos de gráficas (Minitab, 2011):

1. U-chart: Dice sí es apropiado determinar la capacidad del proceso basado en los datos que tenemos observando sí está en control.
2. Plot de Poisson: Prueba que los datos son significativos.
3. Porcentaje defectivos acumulados: Esta determina sí se han colocado suficientes datos de muestra para establecer el porcentaje de defectos.
4. Histograma: Ayuda a determinar la distribución que sigue el porcentaje de defectivos.

Basados en el análisis efectuado que se muestra se puede decir con un 95% de confianza que los datos están en control, que la muestra fue suficiente para determinar la capacidad del proceso y que el porcentaje de defectos es de 1.36% +/- 0.04% y 13,600 DPMO.

## **TERCERA ETAPA DMAMC: ANÁLISIS**

En esta etapa del DMAMC se toman los datos medidos en las secciones anteriores y se procede a analizarlos. Para poder hacer esto se ocupa la ayuda de los expertos del proceso y los informantes estratégicos del equipo conformado al inicio del proyecto. Lo que sigue es reunir a este equipo e identificar las entradas típicas potenciales.

### ***Identificación de entradas críticas potenciales***

Para esto es necesario efectuar con el equipo de expertos una “lluvia de ideas” que es un proceso de generación de ideas que se realizó de la siguiente manera (Escuela Internacional de Negocios, 2010):

1. Cada miembro del equipo genera una sola idea cada vuelta, de manera ágil, ordenada y sin discusiones. Otro enumera cada una de las ideas expresadas.

2. Una vez finalizada la lluvia de ideas se procedió a descartar las ideas repetidas.
3. Se verificó que las ideas restantes tengan relación con el problema a analizar.
4. Se clasificó las ideas restantes en el diagrama de causa y efecto descrito a continuación.

Este diagrama ayuda a obtener las causas potenciales pero no determina cuáles son las críticas. Antes, es necesario jerarquizar las ideas y comenzar a trabajar con las de mayor importancia. Para esto se usa la técnica de grupo nominal. La técnica de grupo nominal es usada para jerarquizar propuestas. Tiene como objetivo lograr consenso entre los participantes de un equipo. Para aplicarlo, cada miembro del equipo asigna un nivel de importancia a cada idea o propuesta, luego se combinan las puntuaciones de todos los miembros y se suman. Las ideas con mayor número serán las más importantes (Escuela Internacional de Negocios, 2010).

Después de que cada miembro del equipo de mejora llenó el formato para jerarquizar ideas, se suman las calificaciones. Las propuestas más importantes son las primeras seis. Éstas serán las que se usarán para determinar las entradas críticas en la siguiente sección. Además de esta jerarquización, los resultados fueron validados observando las respuestas de las entrevistas.

### ***Determinar las entradas críticas (DOE)***

Las variables del proceso definidas a través del diagrama de causa y efecto y el TGN<sup>4</sup> deben ser confirmadas. Para esto se usó el diseño factorial asistido por el software de Minitab. Ésta es una de las técnicas estadísticas de diseño de experimentos, DOE. Esta técnica es usada para planear un experimento y analizar los resultados de manera objetiva, para obtener conocimiento de un proceso con respecto a los factores importantes del mismo, y a definir mejores niveles de operación en cuanto al centrado del proceso y a la reducción de su variación (Escuela Internacional de Negocios, 2010).

Los pasos para el uso de DOE son (Op. Cit.):

---

<sup>4</sup> TGN: Técnica de grupo nominal

1. Seleccionar la variable de respuesta. En este caso la variable de respuesta seleccionada fue la soldadura insuficiente, justificada con el Pareto producto de la definición del problema en la etapa inicial del DMAMC.
2. Verificar el estado de las máquinas donde se va a experimentar y corregir condiciones anormales. Aquí se tomaron los puntos “Fingers del conveyor en mal estado”, “pre-calentadores dañados” y “Limpieza del pozo laminar” que aparecen como algunas de las causas potenciales generadas del TGN de sección anterior.

Se procedió a revisar y corregir dichas condiciones, como se indica a continuación. El “*finger*” dañado como se observa en el lado izquierdo de la figura fue remplazado por uno en buenas condiciones como el que se muestra a la derecha. Se compraron los “*fingers*” necesarios para el remplazo de los que se encontraban en mal estado. En esta fotografía se puede observar esta actividad. Al analizar un video tomado al proceso se pudo observar que una de las razones por las que los “*fingers*” se dañan es porque el operario hala el marco de tarjeta antes que el “*conveyor*” lo suelte, doblando de esta manera los “*fingers*”. Se entrenó al operario para que saque el marco sin halarlo.

Luego se limpiaron los pozos de estaño. Esto se realizó justo antes de realizar las corridas del experimento.



**Figura 3: Proceso del baño de soldadura.**

El pozo de estaño fue limpiado por los operadores de la máquina sacando la escoria producto de la fundición usando una cuchara de acero inoxidable y un recipiente para desperdicio. Por último, se revisaron los pre-calentadores midiendo su continuidad eléctrica para verificar que estaban funcionando correctamente. No se encontró alguno en mal estado. En el momento en que se estaba trabajando en corregir estas condiciones, surgió otra causa potencial que no fue identificada en el TGN. Los marcos que sostienen la tarjeta de circuito al momento de pasar por el

*conveyor* no estaban en buen estado, tenían golpes en la parte interna que soporta a las tarjetas de circuito, esto podría causar que el mismo no estuviese a nivel con la ola de estaño por lo que se llevaron al taller de la empresa a ser rectificadas.

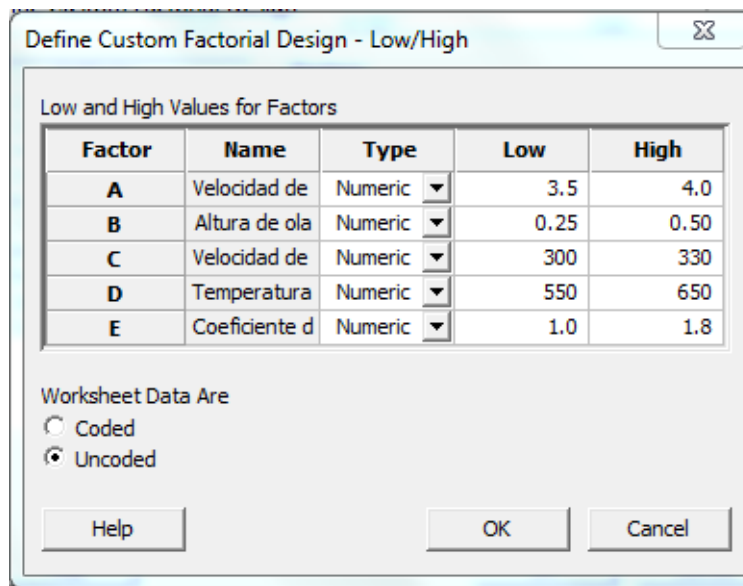
1. Seleccionar las variables a experimentar y sus niveles. Se eligen los factores a experimentar:

- 1.1 Coeficiente de flux
- 1.2. Velocidad de *Conveyor*
- 1.3. Altura de ola' 'Velocidad de olas
- 1.4. Temperatura de pre-calentamiento

Éstos están relacionados con los parámetros de la máquina y son los que fueron elegidos con alto grado de importancia en el TGN como causas potenciales.

2. Determinar el tipo de diseño a usar y el número de réplicas.

El diseño elegido es el “full” factorial de dos niveles y cinco factores por lo que se denomina como un DOE factorial de  $2^5$  para un total de 32 réplicas. Usando el Minitab, se ingresaron los factores y sus réplicas:



**Figura 4: Factores del DOE**

Fuente: Minitab

Como es de dos niveles es necesario ingresar los valores “Low” y “High” en Minitab, por lo que, junto con los expertos del proceso, se eligieron los valores que aparecen en la figura anterior.

3. Realizar las pruebas aleatoriamente.

El Minitab se encarga de volver aleatorias las corridas de acuerdo a los factores.

La primera columna muestra como sería el orden de las corridas si no se hubiese aleatorizado el experimento, la segunda indica el orden en que deben correrse.

Se procedió a realizar las corridas cambiando cada uno de los factores de acuerdo a la tabla del DOE.

### 3.1 Coeficiente del flux.

Para medir la calidad de la mezcla del flux se usó una técnica llamada “titration” recomendada por el fabricante del flux (Departamento de mantenimiento, 2011). Esta prueba consiste en determinar el cociente de flux de la mezcla dividiendo la cantidad de gotas del reactivo del flux nuevo entre la cantidad de gotas de reactivo aplicado al flux que se está usando. Si el cociente es igual o menor a 0.94 entonces se decide no usar el flux y debe ser remplazado (FCT Assembly, 2011).

Como el diseño es de dos niveles se usaron dos tipos de mezcla, una con un cociente de 1.1 y otro de 1.8. Cada mezcla estaba contenida en un recipiente especial y se cambiaba en el dispensador de flux de la máquina de acuerdo a la tabla del DOE.

### 3.2 Velocidad del *conveyor*.

Este parámetro se ajusta directamente desde la pantalla de control de la máquina y se eligieron los valores de 300 y de 330 revoluciones por minuto.

### 3.3 Nivel de estaño.

Como causa potencial determinada en el TGN, el nivel de estaño es la cantidad de aleación en la pila de la máquina. Se diseñó un dispositivo para medir la altura desde el nivel superior de la pila hasta el nivel del estaño. Solamente tiene dos marcas, a 0.25” y a 0.50” para efectos del experimento.



**Figura 5: Control del nivel de estaño.**

La barra amarilla mostrada en la figura anterior tiene una marca que indica el nivel de estaño.

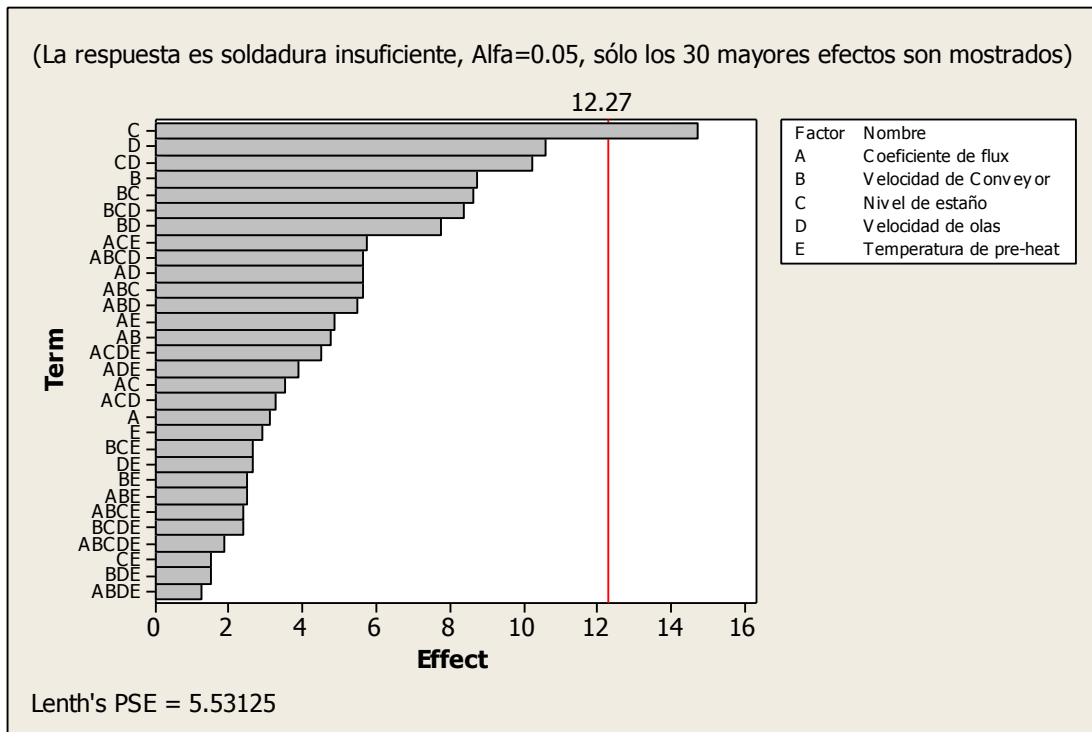
#### 3.4 Velocidad de olas y temperatura de pre-calentadores.

Estos factores se configuran en la pantalla de control de la máquina. Los valores de velocidad de ola son de 3.5 y 4.0 pies por minuto y los de la temperatura de pre-calentadores son de 550°F y 650°F.

#### 4. Analizar los resultados.

Una vez hechas las corridas, se anotan los resultados de la variable de respuesta defectos por soldadura insuficiente en la siguiente columna de la tabla DOE y se corrió el análisis del diseño factorial del Minitab.

Se usó una gráfica de Pareto de los efectos para comparar la magnitud relativa y la significancia estadística tanto de cada uno como de la interacción de los mismos. Minitab gráfica los efectos en orden decreciente de su valor absoluto.



**Figura 6: Gráfica Pareto de los efectos**

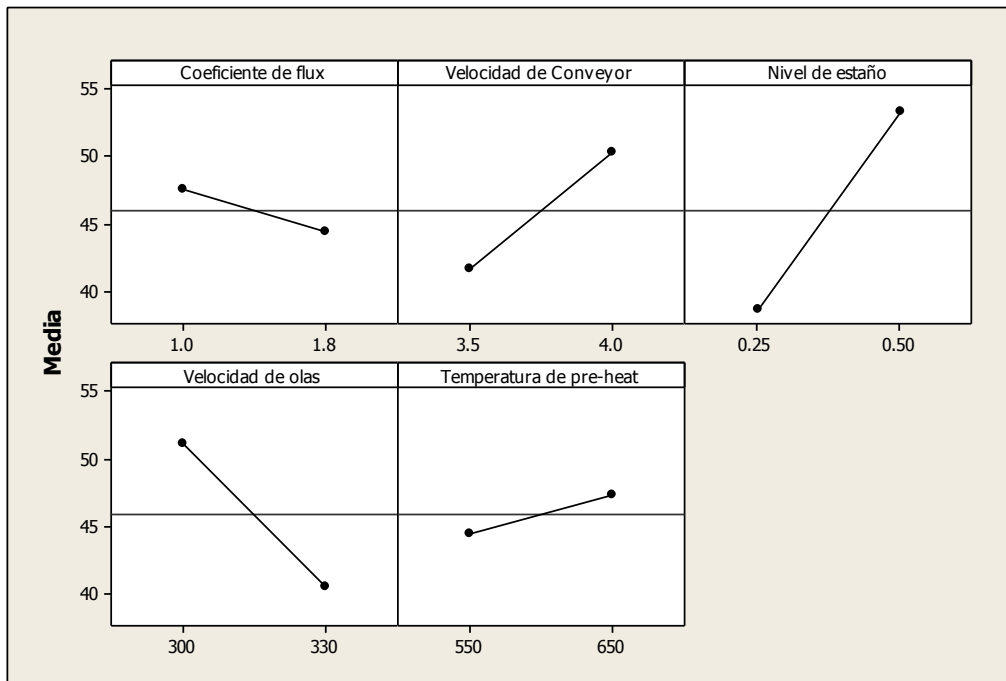
La línea de referencia en la gráfica indica cuáles efectos son significativos (Minitab, 2011). Con esto se determina al factor C = Nivel de estaño como el efecto de mayor significancia, por lo tanto, la causa crítica del proceso. Esto se valida desde el enfoque cualitativo al observar las respuestas de las entrevistas realizadas a los miembros del equipo de mejora.

**CUARTA ETAPA DMAMC: MEJORAR**

Una vez analizado el proceso, se procede a la etapa de mejora en la que se busca optimizar y robustecer el proceso para reducir su variación (Escuela Internacional de Negocios, 2010). Siguiendo el DOE de la sección anterior, se procedió a obtener el modelo final usando un análisis de efectos para cada factor.

Minitab grafica las medias en cada nivel para cada uno de los factores y los conecta con una línea. Estas gráficas son usadas para comparar las magnitudes de cada uno de los efectos.





**Figura 7: Gráfica factorial de efectos.**

De acuerdo a esta gráfica se concluyó que los valores óptimos para minimizar los defectos en el proceso de soldadura son:

1. Coeficiente de flux: 1.8
2. Velocidad del conveyor: 3.5 ft/min
3. Nivel de estaño: 0.25"
4. Velocidad de olas: 330rpm
5. Temperatura de pre-calentadores: 500°F

Estas gráficas también indican que a pesar de haber elegido estos valores como óptimos, el coeficiente de flux y la temperatura de los pre-calentadores se mantienen ligeramente similares cuando se cambia los valores de 1.1 a 1.8 y 550°F a 650°F, respectivamente. También, se puede observar que la respuesta de soldadura insuficiente incrementa cuando se aumenta la velocidad del "conveyor" y especialmente el nivel de estaño, pero disminuye cuando aumenta la velocidad de las olas.

Para mejorar hay que ajustar los parámetros de la máquina con estos valores, sin embargo, hay que tomar en cuenta que la máquina podría no ser capaz de

mantenerlos y que el proceso podría no ser consistente. Para esto se hizo un estudio de Cpk<sup>5</sup> para verificar que se podían producir resultados dentro de unos límites o de un rango de valores (Montgomery, 2004). Luego de establecer un rango de valores y tomar mediciones en la máquina, se ingresaron los datos al Minitab para realizar el estudio de Cpk. Los resultados fueron los siguientes:

1. Velocidad del “conveyor”: 3.5 ft/min +/-0.5, Cpk = 1.41
2. Temperatura de pre-calentadores: 550°F +/-25, Cpk = 1.35
3. Coeficiente de flux: 0.94-1.8, Cpk = 1.58

Todos los Cpk son superiores a 1.33 que es el mínimo recomendado para decidir sí el proceso está en control o no (Op. Cit). El rango del nivel de estaño se tomo del dispositivo que fue creado para medir el 0.25” al que le fueron marcados los límites superior e inferior de +/-0.125” de acuerdo a la indicación que se le dio al operario. En el caso de la velocidad de las olas, éste es un parámetro que se configura en la máquina, pero no es medido por la misma, por lo que se tomará simplemente 330rpm.

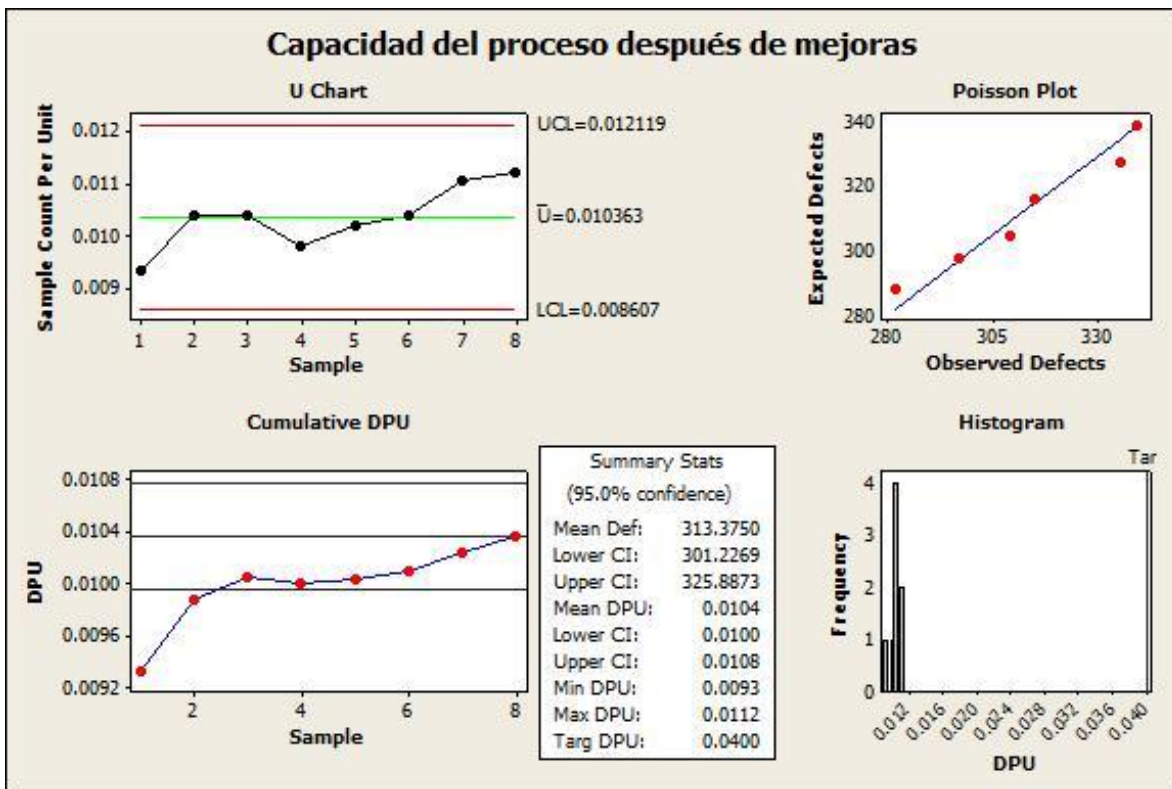
En base a lo anterior, los valores recomendados para el proceso son:

1. Coeficiente de flux: 0.94-1.8
2. Velocidad del “conveyor”: 3.5 ft/min +/-0.5
3. Nivel de estaño: 0.25” +/-0.125
4. Velocidad de olas: 330rpm
5. Temperatura de pre-calentadores: 550°F +/-25

Configurando la máquina con estos valores, se tomaron datos de los defectos de soldadura de 108 tarjetas de circuito diarias, usando el cálculo del tamaño de la muestra. Una vez obtenido dichos datos se procedió a realizar un análisis de Poisson de capacidad de proceso para poderlo comparar con el proceso antes de estas mejoras. Con un nivel de confianza de 95% se puede decir que el proceso es capaz de mantener un porcentaje de defectos de 1.04% +/-0.04% y un nivel de defectivos por millón de oportunidades de 10,400 DPMO.

---

<sup>5</sup> Cpk: El índice de capacidad del proceso.



**Figura 8: Capacidad de proceso después de la mejora.**

De estos resultados y de los obtenidos antes de realizar las mejoras se puede observar que el porcentaje de defectos bajó de 1.36% a 1.04% y los DPMO de 13,600 a 10400. Esta mejora de la calidad de soldadura es evidente pero no indica que será suficiente para alcanzar la meta de 96% de rendimiento de todo el proceso, por lo que se procede a observar los registros de defectuosos del proceso y calcular el rendimiento después de haber implementado estas mejoras.

Para poder validar la hipótesis de investigación se debe revisar los datos de rendimiento tal y como los tiene el departamento de calidad de TRC Honduras, de la misma manera como se tomaron los de los antecedentes. El rendimiento de calidad alcanzó la meta de 96.0% llegando incluso a un promedio de 98.1% por lo que se acepta la hipótesis de investigación.

**COSTEO FINANCIERO DEL PROCESO ACTUAL**

La justificación de esta tesis se planteó de acuerdo al costo financiero que incurre TRC Honduras en la corrección de los defectos, del proceso de soldadura por ola de las tarjetas de circuito.

**Tabla 1: Detalle de los costos de materia prima y mano de obra.**

Mes	Producción de tarjetas 53064	Defectivos @1.04%	Costo1 @\$0.105/ Defectivo	Defectuosas 1era Prueba	Costo2 @\$0.155	Defectuosas 2da Prueba	Costo2 @\$0.200	Total
ago-11	33513	19,518	\$ 2,044	129	\$ 20	6	\$ 1	\$ 2,065
sep-11	30004	17,474	\$ 1,830	116	\$ 18	5	\$ 1	\$ 1,849
oct-11	34072	19,844	\$ 2,078	131	\$ 20	6	\$ 1	\$ 2,100
nov-11	30500	17,763	\$ 1,860	118	\$ 18	5	\$ 1	\$ 1,879
dic-11	23036	13,416	\$ 1,405	89	\$ 14	4	\$ 1	\$ 1,420
ene-12	33985	19,793	\$ 2,073	131	\$ 20	6	\$ 1	\$ 2,094
feb-12	20977	12,217	\$ 1,279	81	\$ 13	4	\$ 1	\$ 1,293
mar-12	29703	17,299	\$ 1,812	114	\$ 18	5	\$ 1	\$ 1,830
abr-12	37051	21,578	\$ 2,260	143	\$ 22	6	\$ 1	\$ 2,283
may-12	40423	23,542	\$ 2,465	156	\$ 24	7	\$ 1	\$ 2,491
jun-12	44495	25,914	\$ 2,714	172	\$ 27	7	\$ 1	\$ 2,742
		<b>Costo 1</b>	<b>\$ 21,819</b>	<b>Costo 1</b>	<b>\$ 214</b>	<b>Costo 1</b>	<b>\$ 12</b>	<b>\$ 22,046</b>

La tabla describe el costo de materia prima y mano de obra en la reparación de los defectos generados en el proceso mejorado. De acuerdo al rendimiento del proceso mejorado, se establece un porcentaje de 1.04 % de defectos en las tarjetas de circuito del modelo 53064 y se obtuvo la cantidad reparaciones mensuales según la producción proyectada. El registro promedio de las tarjetas defectuosas reparados en la primera y segunda prueba según la producción de las dos semanas de mejora es de 0.4%; este porcentaje se utilizó para proyectar la cantidad de tarjetas de circuito que se repararan en las dos fases mencionadas anteriormente

La producción está proyectada con un crecimiento del 15% con respecto al año 2011, dato que se estimó de acuerdo al porcentaje de crecimiento registrado entre el año 2010 y 2011, el cual fue del 20%. En cuanto al proceso de producción de la tarjeta de circuito 53064 se puede observar que los resultados fueron positivos, ya que se muestra una reducción porcentual con respecto al proceso antes de la implementación de mejoras, correspondiente al 12% en la cantidad de defectos y del 86% en la cantidad de tarjetas defectuosas de la primera y segunda prueba.

El beneficio financiero anual estimado del proceso de reparación de tarjetas de circuito es de \$4,335.00, compuesto en un 85% por el costo de materia prima y en 15% por la mano de obra. En resumen se puede concluir que el beneficio más representativo en la reducción de defectos es la minimización del consumo de materia prima y en consecuencia la reducción del costo del proceso de reparación, ya que este representa el factor financiero más costoso del proceso.

## **QUINTA ETAPA DMAMC: CONTROLAR**

La última fase del DMAMC es vital pues es en la que se establecen las actividades que serán necesarias para poder monitorear y controlar el proceso. La recomendación para el control del proceso ajustado de soldadura por ola es la de elaborar un AMEF<sup>6</sup> que le permita a TRC Honduras:

1. Reconocer y evaluar las fallas potenciales del proceso y los efectos de dichas fallas.
2. Identificar acciones que podrían eliminar o reducir la posibilidad de que ocurran fallas potenciales.
3. Documentar todo el proceso. TRC Honduras puede apoyarse en los resultados de este proyecto para la elaboración del AMEF en donde aplique.
4. Elaborar e implementar un plan de control que incluya registros de las revisiones a los parámetros especificados en el AMEF, de esta manera monitoreamos el proceso.

## **CONCLUSIONES**

Como respuesta a los objetivos planteados se presentan las siguientes conclusiones:

1. El rendimiento de calidad de las tarjetas de circuito producto del proceso ajustado de soldadura por ola alcanza un 98.1%, como ésta es mayor al rendimiento meta de 96%, se acepta la hipótesis de investigación.
2. Se estableció que la causa crítica del problema es el nivel de estaño en los pozos de la máquina.

---

<sup>6</sup> AMEF: Análisis de modo y efecto de falla

3. Se logró aplicar la metodología DMAMC con la ayuda del personal de TRC Honduras y así alcanzar un nivel de rendimiento de calidad de al menos 96%.
4. El beneficio proyectado de la implementación de las mejoras para lograr el rendimiento de calidad esperado es de \$4,335.00 anual.
5. Según las causas influyentes señaladas anteriormente se observó que en el proceso no existe un sistema de monitoreo ni de control de parámetros de la máquina. Esto genera bajo rendimiento de calidad de la soldadura, o bien falta de consistencia en los resultados del proceso.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Banco Central de Honduras. (2009-2010). Informe de Bienes para Transformacion 2009 y Expectativas 2010. Recuperado el 07 de Agosto de 2011, de [www.bch.hn](http://www.bch.hn): [http://www.bch.hn/download/maquila/informe\\_maquila\\_2009\\_exp\\_2010.pdf](http://www.bch.hn/download/maquila/informe_maquila_2009_exp_2010.pdf)
- Departamento de mantenimiento/Manual de equipos. (2011).
- Departamento de Recursos Humanos de TRC Honduras. (15 de Enero de 2011). Historia de TRC Honduras. Honduras.
- Escuela Internacional de Negocios. (2010). Programa de mejora continúa "Cero Defectos". 2.24.
- FCT Assembly. (2011). Titration test.
- Gómez, M. (2009). Cómo hacer una tesis de maestría y doctorado: investigación, escritura y publicación. Colombia: Ecoe Ediciones.
- Heizer, J., & Render, B. (2009). Principios de administración de operaciones (Séptima ed.). México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Hernández, S., Fernández, C., & Lucio, B. (2006). Metodología de la investigación. México: Mc GRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES.
- Indium Corporation. (2011). Wave Soldering Guidelines. Recuperado el 20 de Julio de 2011, de <http://www.indium.com/products/circuitboardassembly/wavesolder.php>
- Minitab. (2011). Minitab, software para mejora de la calidad. Recuperado el 31 de Agosto de 2011, de Minitab 16: <http://www.minitab.com/es-US/products/minitab/default.aspx#1>
- Minitab. (2011). StatGuide.

Montgomery, D. (2004). Introduction to Statistical Quality Control. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.

Technology Research Corporation. (2011). Recuperado el 08 de Agosto de 2011, de <http://www.trci.net/>