

**USO DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA EN UN PROYECTO DE MONTAJE DE
UNA CALDERA DE POTENCIA CONSTRUIDA BAJO ASME SECC I PARA LA
DISMINUCIÓN DEL REPROCESO EN SOLDADURA GTAW: ESTUDIO DE CASO**

AUTOR

JHONN MAURICIO CUSPOCA DELGADO

Ing Metalúrgico CWI-AWS

est.jhonn.cuspoca@unimilitar.edu.com

Artículo de Investigación

DIRECTOR

Angie Arenas Piedrahita



La U
acreditada
para todos

**ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA INTEGRAL DE PROYECTOS
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DICIEMBRE 2022**

USO DE LA METODOLOGÍA SIX SIGMA EN UN PROYECTO DE MONTAJE DE UNA CALDERA DE POTENCIA CONSTRUIDA BAJO ASME SECC I PARA LA DISMINUCIÓN DEL REPROCESO EN SOLDADURA GTAW: ESTUDIO DE CASO

JHONN MAURICIO CUSPOCA DELGADO

Ing Metalúrgico CWI-AWS

est.jhonn.cuspoca@unimilitar.edu.com

Universidad Militar Nueva Granada

RESUMEN

Durante la construcción y montaje de recipientes a presión como calderas se hace necesaria la aplicación de soldadura. No obstante, las tareas de soldadura son susceptibles a reprocesos que impactan el cronograma y presupuesto. En el presente artículo se analiza la aplicabilidad de la técnica Six Sigma a un proyecto de montaje de una caldera de potencia construida bajo ASME BPVC Secc I para reducir el reproceso asociado a soldadura GTAW. A través de un alcance descriptivo-explicativo y con un enfoque mixto, la estrategia de investigación-acción atraviesa las diferentes fases de la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar). Se encontró que los principales actores del problema, para el presente caso de estudio, son la porosidad y la falta de fusión. Sus causas estarían relacionadas con características del ambiente (corrientes de aire y lluvia), variables eléctricas, habilidad y actitud del ejecutor, así como tiempos y cantidad de los controles respectivos. Son propuestas acciones de mejora que tendrían efecto simultaneo en los dos tipos de falla, pero también, medidas preventivas para cada tipo de defecto. Se verifica que con la aplicación de esta metodología se puede dar tratamiento a la problemática estudiada de forma sistemática, así como de manera práctica y relativamente sencilla. Se postula que, al disminuir la cantidad de reparaciones derivadas de los defectos de soldadura mediante la implementación de las actividades de mejoramiento sugeridas, el sobre costo disminuiría de manera drástica dada la relación directamente proporcional con los defectos y su respectivo reproceso en soldadura.

Palabras Clave: Calderas, soldadura, Six Sigma, costos, gestión de proyectos, reparación.

ABSTRACT

During the construction and erection of pressure vessels like boilers, the application of welding is necessary. Nevertheless, welding tasks are susceptible to reworks that impact the project schedule and its budget. This work analyses the applicability of the Six Sigma technique to a boiler assembly project built under ASME BPVC Section I to reduce rework related to GTAW welding. Through a descriptive-explicative scope and with a mixed approach, the investigation-action strategy goes through the different stages of the DMAIC methodology (Define, Measure, Analyze, Improve, Control). It was found that the main triggers of the problem, for the present case study, are porosity and lack of fusion. Their causes are related to environment features (air current and rain), electric variables, executor performance and skills as well as timing and quantity of the respective controls. Improvement actions that would have a simultaneous effect on both failure types are proposed, but also, preventive measures for each type of

defect. It is verified that with the application of this methodology the studied problem can be treated in a systematic, as well as in a practical and relatively simple manner. It is postulated that, reducing the amount of repair derived from welding defects with the implementation of the suggested enhancement activities, the cost overrun could dramatically decrease given the direct and proportional relationship between the defects and their respective welding rework.

Keywords: Boilers, welding, Six Sigma, costs, project management, repair.

INTRODUCCIÓN

Los proyectos de construcción y montaje de plantas industriales, en diferentes sectores como el minero, petrolero, energético, etc., implican la aplicación de soldadura como una de las actividades más relevantes. En el caso específico de plantas de generación de energía, donde se usan múltiples recipientes a presión, específicamente calderas, dicha actividad se torna crítica, más aún cuando por reprocesos en esta tarea se impacta el cronograma o el presupuesto del proyecto (Shinde & Inamdar, 2014).

Por otra parte, los recipientes o equipos a presión a nivel industrial son activos de especial atención durante su construcción y mantenimiento, considerándose críticos por su elevado costo e importancia para la producción de las compañías, además del riesgo a la seguridad del personal que supone una falla en uno de estos equipos (Cyril et al., 2020). Por esta razón, para estos componentes se especifican los estándares más altos de diseño, fabricación, instalación y puesta en marcha. En el caso específico de fabricación e instalación, de los múltiples procesos de soldadura existentes, generalmente se selecciona el proceso GTAW a efectos de cumplir los requerimientos más exigentes (O'Brien & American Welding Society [AWS], 2015).

Al ser la soldadura, concretamente el proceso GTAW, una técnica que requiere experiencia y conocimientos relevantes para su ejecución, supervisión e inspección, una vez se presentan rechazos que derivan en reprocesos, no es fácil para el equipo de proyecto hallar la solución al problema, y en algunas ocasiones se estudia el tema de forma muy superficial o se aborda la situación tratando de resolver mediante ensayo y error.

A través de la presente investigación, se aplica el enfoque Six Sigma, específicamente la metodología DMAIC a un caso de estudio puntual para dar respuesta a la pregunta que guía este estudio; ¿Cómo la aplicación de la metodología Six Sigma en un proyecto de montaje de una

caldera de potencia construida bajo ASME BPVC Secc I, puede contribuir a la reducción de sobrecostos asociados a reprocesos de soldadura GTAW?

En consecuencia, como objetivo general se pretendió analizar la aplicabilidad de la metodología Six Sigma en un proyecto de montaje de una caldera de potencia construida bajo ASME Secc I para la reducción del reproceso de soldadura GTAW. Para tal fin se buscó específicamente describir las características de la metodología Six Sigma y el proceso de soldadura GTAW, así como identificar las causas del reproceso en el caso de estudio analizado y su relación con el sobrecosto y finalmente, proponer lineamientos para disminuir los reprocesos en soldadura GTAW desde el mecanismo de aplicación de la metodología DMAIC - Six Sigma.

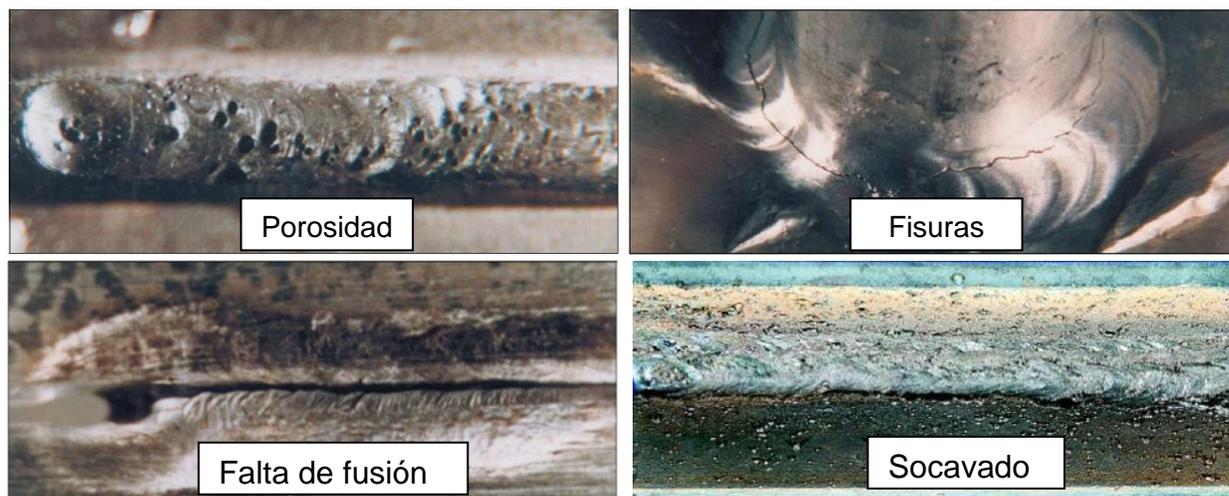
Es conveniente entonces conocer que la soldadura es el proceso de unión que produce coalescencia de materiales calentándolos a la temperatura de fusión, con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de metal de aporte (Jenney & AWS, 2001). Específicamente el proceso de soldadura GTAW deriva su nombre de las palabras en inglés Gas Tungsten Arc Welding, que en español se traduciría como Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo de Tungsteno y Gas de protección que generalmente es Argón (O'Brien & AWS, 2004).

Aunque actualmente hay grandes avances en procedimientos de soldadura GTAW automatizados, los cuales dependen muy poco de la intervención humana, su elevado costo aún limita la posibilidad de su aplicación en campo (Mitru et al., 2020) y por tal razón en los proyectos de construcción de plantas industriales aún se depende en gran medida del recurso humano, tanto para su ejecución como para su supervisión, inspección y evaluación.

Así pues, la mencionada intervención humana trae consigo, inevitablemente, la susceptibilidad a errores conocidos técnicamente como discontinuidades, algunos aceptables y otros no aceptables, estos últimos considerándose defectos que requieren ser intervenidos para su respectiva reparación, lo cual se traduce en un reproceso que implica mayores costos de producción y retrasos (Leisner, 2017). En la Figura 1, se muestran de manera gráfica algunos defectos de soldadura.

Figura 1

Defectos comunes en soldadura.



Fuente. Adaptado de Weld and Base Metal Discontinuities (págs. 2-2, 2-5, 2-8, 2-15) por American Welding Society, 2008.

Con referencia al marco normativo, la Sección Primera del Código de Calderas y recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos cubre dentro de su alcance las reglas para la construcción de Calderas de Potencia teniendo en cuenta las limitaciones descritas en dicho documento (American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2021). No obstante, en la tabla 1 se listan otras secciones del Código relacionadas:

Tabla 1

Secciones del código ASME BPVC aplicables a la construcción de caderas de potencia.

Sección	Descripción
I	Reglas para la construcción de Calderas de Potencia
V	Examinación No Destructiva
IX	Calificación Estándar para procedimientos de Soldadura, Soldadura Fuerte y Fusión.

Nota. A la fecha de redacción del presente artículo la última edición es la de 2021.

Fuente. Elaboración propia.

Como mecanismo de tratamiento al problema, se han propuesto soluciones desde el punto de vista del proceso, haciendo uso del enfoque Six Sigma, técnica desarrollada por Motorola en la

década de los 80's (Rezaei et al., 2019). Esta estrategia busca la mejora de los procesos con un enfoque de satisfacción del cliente, prevención y compromiso por parte de la gerencia, donde llegar al número 6 Sigma implica reducir la variación del proceso y los productos defectuosos a 3.4 Defectos por Millón de Oportunidad, DMPO (Aris & Nindiani, 2020). La estrategia Six Sigma más conocida es el proceso DMAIC que implica Definir, Medir, Analizar, Improve/Mejorar y Controlar (Shinde & Inamdar, 2014).

En tal sentido, la ejecución de la presente investigación se justifica en razón a que, el problema en el que se centra la presente investigación es un obstáculo común en el cual se está en búsqueda continua de estrategias de mejora. Como fue antes mencionado, los reprocesos en soldadura, para el caso de recipientes a presión, particularmente calderas de potencia construidas bajo ASME Secc I, es un problema que debe ser resuelto para evitar impactos significativos en el presupuesto y cronograma de los proyectos de construcción que dentro de su alcance relacionan este tipo de equipos.

No obstante, por la dinámica misma de los proyectos, no es fácil estructurar una solución metódica a la situación adversa que aquí se estudia y por el contrario se afronta la problemática sobre todo de manera empírica, lo cual lleva a que no se encuentre de manera efectiva la causa o causas raíz que ocasionan los defectos, o que las acciones correctivas no queden debidamente documentadas.

Por tal razón se hizo uso del enfoque Six Sigma con enfoque DMAIC, por cuanto su aplicación ha sido documentada en los últimos años con resultados positivos en diferentes aplicaciones a nivel industrial y en casos estudio de naturaleza similar al aquí estudiado (Aris & Nindiani, 2020). Por ejemplo, Love et al. (2018), abordaron el tema del costo de los reprocesos desde la perspectiva de la construcción sugiriendo algunas lecciones aprendidas.

Es así como algunos autores han estudiado el fenómeno de defectología de soldadura por diferentes procesos y también por proceso GTAW en diferentes equipos y han propuesto diferentes soluciones. Cyril et al. (2020) estudiaron defectología en soldadura por procesos SMAW, GMAW y FCAW en aceros para calderería. La aparición de metodologías Six Sigma y Lean que se han empleado en diferentes áreas del conocimiento, específicamente en producción y manufactura, han sido aprovechadas por diferentes investigadores como Razei et al. (2019) para ser aplicados en recipientes a presión de refinerías. Por su parte, Anderson y Kovach (2014)

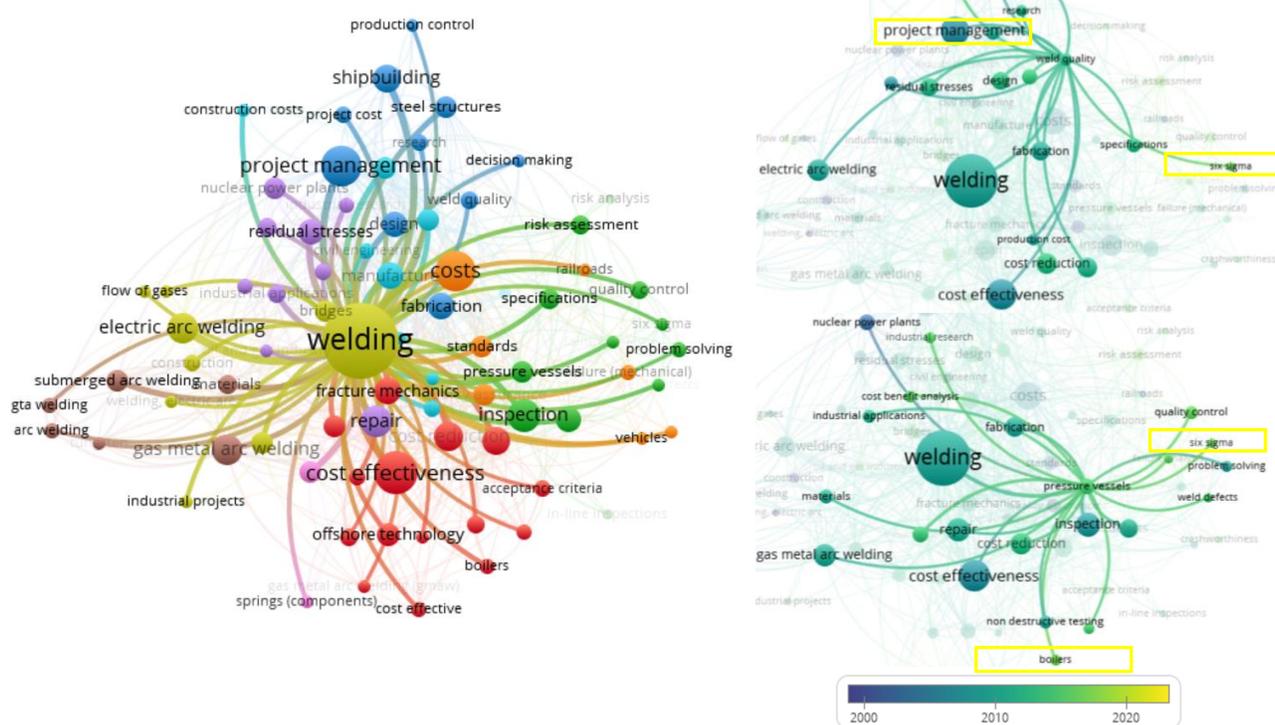
aplicaron Six Sigma para reducir defectos de soldadura en proyectos de paradas mayores de planta para mantenimiento.

Paralelamente, en Pakistán Yousaf y Ikramullah (2014) aplicaron este concepto para disminuir la tasa de reparaciones en soldadura mediante el control y determinación de variables críticas clave de entrada al proceso. Por otro lado, Barathi et al. (2017) en su caso de estudio aplicaron enfoque Lean-Six Sigma para reducir defectos de soldadura en un componente de una válvula en la cual se usó proceso SAW.

Por último, es importante destacar que para hacer el presente estudio del estado del arte se hizo una búsqueda en la base de datos bibliográfica Scopus, usando las palabras welding, Project Management and cost, (soldadura, gestión de proyectos y costo). Se exportaron los resultados de la búsqueda mediante CSV Excel y finalmente se generó con el software VOSviewer el mapa bibliográfico que se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Visualización bibliométrica según criterio de búsqueda



Nota. A la izquierda, resultado de la búsqueda de las palabras en inglés soldadura, gestión de proyectos y costo. Derecha, acercamiento con línea de tiempo.

Fuente. Elaboración propia.

De tal modo, en la Figura 2 a la izquierda, se observa de manera general el mapa de la información bibliográfica y las relaciones de las palabras seleccionadas como criterio de búsqueda. Adicionalmente, para ver la intersección de estas con las palabras Six Sigma y caldera (boiler) se hizo un acercamiento que, sumado al uso de la línea de tiempo, según Figura 2 derecha, muestra que en los últimos años publicaciones científicas se han encaminado hacia la metodología Six Sigma en casos específicos como calderas y que no hay muchas publicaciones en tal sentido en comparación con el global de publicaciones relacionadas con soldadura y gestión de proyectos.

METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS

Se planteó un alcance descriptivo-explicativo y mediante un enfoque mixto, pero principalmente cualitativo se abordó el problema de investigación a un caso tipo o estudio de caso, que se fundamenta en un proyecto de construcción y montaje de una caldera de potencia construida bajo ASME Sección I. En consecuencia, mediante un diseño investigación-acción se estudió la problemática acá formulada haciendo uso del enfoque Six Sigma como propuesta para mitigar o eliminar el impacto negativo de la defectología de soldadura en el costo de un proyecto que tenga las mismas características que las del estudio de caso.

Concretamente se aplicó la metodología DMAIC, por lo cual la investigación atravesó las diferentes etapas de la metodología: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. La población analizada fue el consolidado de soldaduras ejecutadas en la etapa de montaje en sitio, siendo la muestra el total de soldaduras inspeccionadas por ensayo de radiografía industrial (RT).

RESULTADOS

Tomando en cuenta que, durante el montaje de la caldera en cuestión se presentó una defectología relevante, se tomó la decisión de hacer uso del enfoque Six Sigma para revisar su aplicabilidad y buscar dar solución a esta desviación. Se ejecutó la metodología DMAIC, en la siguiente forma:

Fase de definición:

En esta etapa se estableció el propósito de la aplicación de esta metodología al caso estudio particular, el cual está alineado con los objetivos de la presente investigación. En síntesis, se define como propósito general el uso del enfoque Six Sigma buscando con esto entender el mecanismo de aplicación de esta metodología para emplearla en futuros proyectos donde se

tengan reprocesos con naturaleza similar a la aquí estudiada y con ello implementarla de una forma más práctica, rápida y eficaz a este tipo de eventos adversos dada la experiencia adquirida con esta primera aplicación del enfoque.

Fase de medición:

Haciendo uso del consolidado de defectos de soldadura final del proyecto en cuestión, a partir de los reportes de radiografía industrial (F. Oviedo, comunicación personal, 29 de agosto de 2022) se hizo la caracterización de la defectología y se conformó el listado que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2

Listado de defectos de soldadura GTAW reportados por radiografía para el caso estudio.

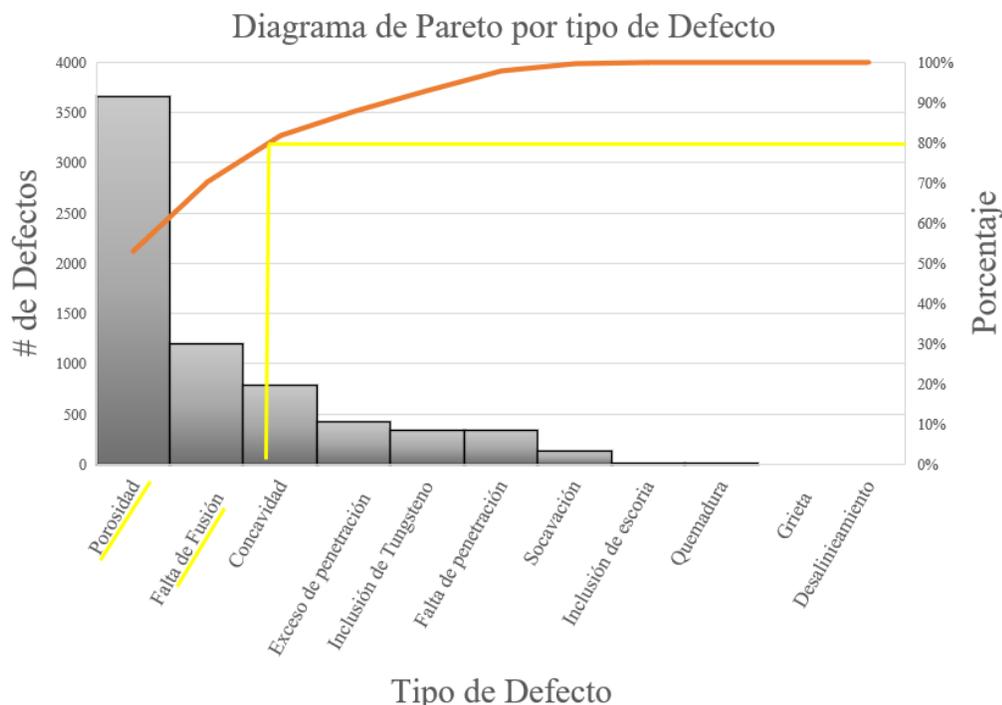
Tipo de defecto	Cantidad
Grieta	2
Falta de Fusión	1203
Falta de penetración	339
Exceso de penetración	422
Quemadura	9
Inclusión de escoria	10
Inclusión de Tungsteno	341
Porosidad	3651
Concavidad	790
Socavación	137
Desalineamiento	0
Total	6904

Fuente. Elaboración propia con base en información de consolidado final reportes de radiografía a partir de comunicación personal, 29 de agosto de 2022.

Es así como en la tabla 2 se encuentran discriminada la cantidad de rechazos por defecto que se constituyeron en reprocesos y que requirieron ser reparados. En total, por radiografía industrial se reportó un total de 6904 defectos. Para hacer un análisis de criticidad y determinar los tipos de defectos más relevantes a los que se les priorizó su tratamiento, se hizo uso del diagrama de Pareto que se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Diagrama de Pareto aplicado al listado de defectos.



Fuente. Elaboración propia con base en listado de la tabla 2.

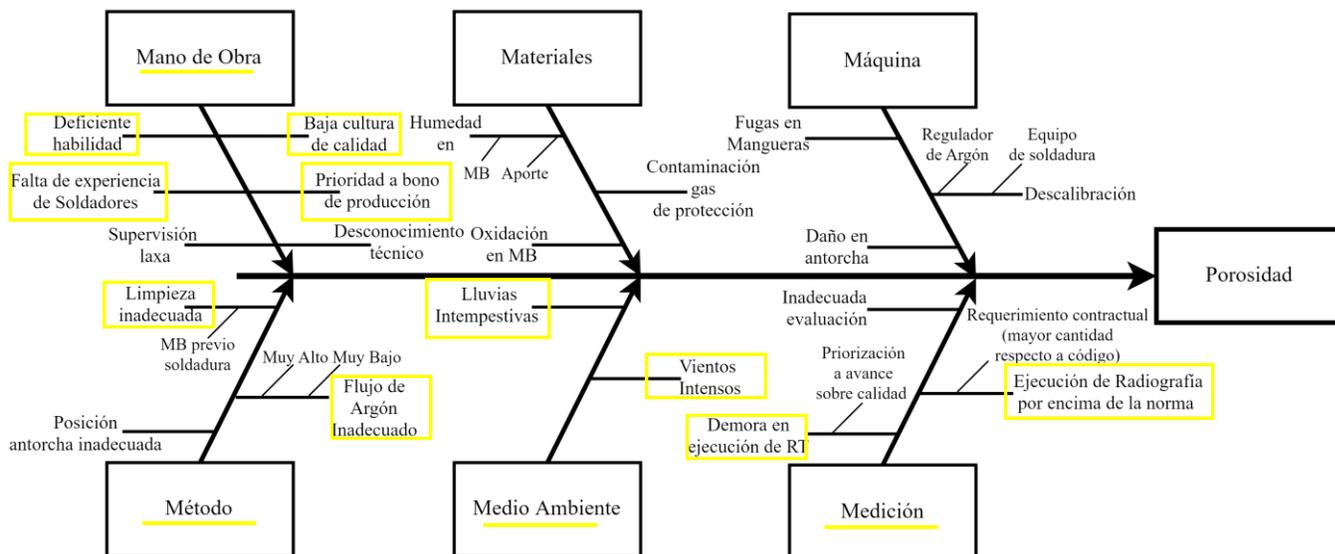
Es evidente del diagrama de Pareto mostrado en la Figura 3 que porosidad y falta de fusión acumulan alrededor del 80% de los rechazos, por lo cual estos dos tipos de defectos fueron tomados como críticos para posterior análisis.

Fase de análisis:

En tal sentido, para identificar las posibles causas raíz de la defectología se empleó la herramienta conocida como diagrama Causa- Efecto (6M) y de una lluvia de ideas con algunos integrantes del equipo de proyecto fueron propuestos diferentes factores relacionados con los defectos priorizados en la fase anterior. En la Figura 4 para el defecto porosidad y en la Figura 5 para el defecto falta de fusión se muestran las causas postuladas.

Figura 4

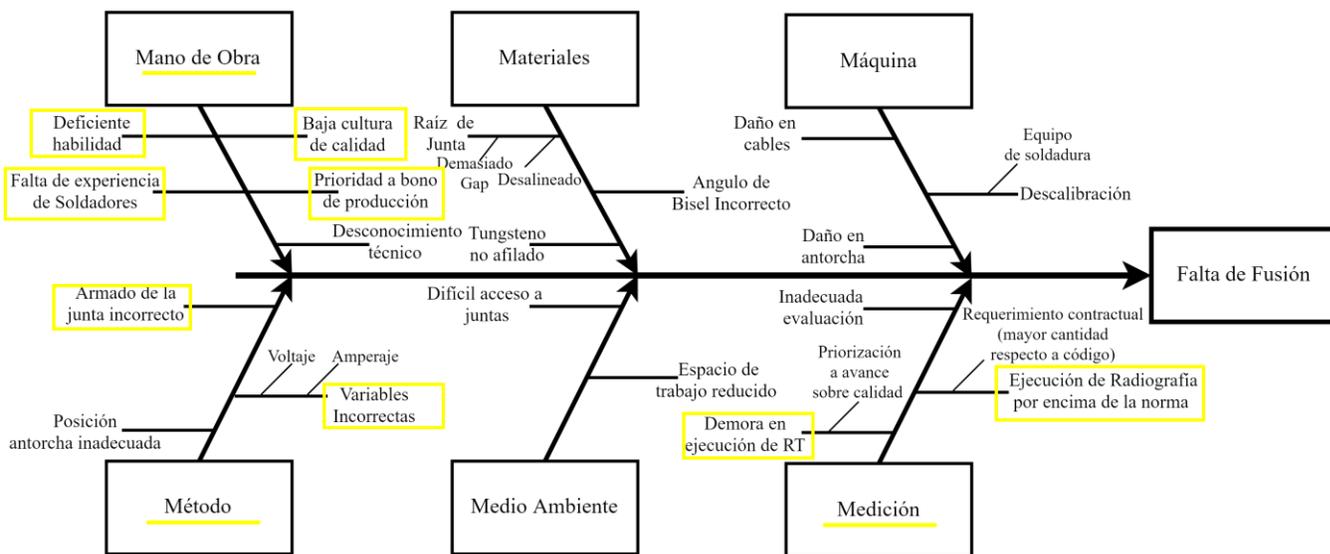
Diagrama causa efecto defecto de soldadura porosidad.



Fuente. Elaboración propia.

Figura 5

Diagrama causa efecto defecto de soldadura falta de fusión.



Fuente. Elaboración propia.

En términos generales, al ser el proceso de soldadura GTAW dependiente de las capacidades y habilidades del ejecutor, para los dos casos se determinó Mano de Obra como variable crítica. Del mismo modo, causas relacionadas con el factor Medición aparecen en los dos diagramas e igualmente se le estableció una alta relevancia.

Sumado a esto, en el caso específico de porosidad se determinó que el Medio Ambiente juega un papel relevante, pues las corrientes de aire y las lluvias, resultarían determinantes en la aparición del defecto. Relacionado con esto, el Método, asociado con limpieza previa y flujo de Argón impactarían de manera adversa el proceso. Por su parte, para el caso de falta de fusión, también se destacó el Método como factor clave, el cual está relacionado principalmente con las variables de Voltaje y Amperaje, al cual se asignó una fuerte influencia en la aparición del defecto. En los dos diagramas se resaltan en amarillo causales catalogadas como de impacto relevante para los dos tipos de falla.

Fase de mejora (Improve):

Dado que se evidenciaron causas específicas a cada una de las fallas de soldadura, pero que por otro lado se identificaron causas específicas, consecuentemente fueron propuestas medidas de mejora en la tabla 3. Dicho cuadro tiene columnas para las variables Método, Medio Ambiente, Mano de Obra y Medición.

En la descripción de la tabla 3 se encuentran relacionadas las medidas de mejora aplicables al factor Método específicas para cada una de las dos fallas determinadas como críticas. Del mismo modo, puntualmente en el caso de porosidad fueron establecidos medidas de mejora para la variable Medio Ambiente, la cual, para falta de fusión, se determinó como no relevante y por tanto medidas de mejora en este caso no serían aplicables (N/A). Finalmente, fueron propuestas acciones de mejoramiento para variables Mano de Obra y Medición que impactarían positivamente en los dos tipos de defecto.

Tabla 3*Descripción medidas de mejora según factor.*

Tipo de defecto	Método		Medio Ambiente		Mano de Obra		Medición	
	Causa	Medida Mejora	Causa	Medida Mejora	Causa	Medida Mejora	Causa	Medida Mejora
Porosidad	Limpieza inadecuada.	Garantizar la correcta limpieza del Metal Base asegurando la remoción de humedad, óxido, grasa y otros contaminantes previo soldadura.	Lluvias intempestivas.	Proteger y aislar con carpas de manera meticulosa el área de soldadura para evitar que agentes externos como la lluvia y las ráfagas de viento afecten el proceso.	Deficiente habilidad.	Asegurar la ejecución de soldaduras presión-presión con personal altamente calificado y experimentado	Demora en ejecución de RT.	Hacer seguimiento al menos semanal o quincenal con radiografía industrial para no permitir acumulación de avance sin inspeccionar. Evaluar el uso de Ultrasonido como alternativa para no retrasar el avance.
	Flujo de Argón inadecuado.	Verificar que flujo de Argón se encuentre en rango establecido en procedimiento calificado (WPS).	Vientos intensos.		Falta de experiencia de Soldadores.	mediante prueba de calificación y revisión de CV. Reubicar soldadores con alto % de rechazo en soldaduras no presión.		
Falta de fusión	Armado de Junta incorrecto.	Chequear armado de junta para asegurar abertura, ángulos y alineación correctos. Involucrar en esta verificación no solo al personal de tubería, sino también al de soldadura, la supervisión y control de calidad.	N/A	N/A	Baja cultura de Calidad.	Realizar campañas de concientización al personal mediante charlas, conferencias y capacitaciones acerca de la importancia de la calidad.	Ejecución de Radiografía en cantidad superior a Código.	Revisar con Cliente especificaciones técnicas para asegurar que no se ejecuten RT innecesarias. De no aceptarse la solicitud, informar oportunamente las implicaciones de ejecutar radiografía en mayor cantidad con respecto a código.
	Variables incorrectas Amperaje/Voltaje.	Confirmar que la configuración de los equipos de soldadura tanto corriente como tensión se encuentren en el rango establecido en el procedimiento calificado (WPS).			Prioridad a bono de producción.	Relacionar el bono de producción con la calidad de las soldaduras.		

Nota. Las medidas de verificación, chequeo, confirmación y aseguramiento deben realizarse en conjunto por ejecutante, supervisor y control de calidad.

Fuente. Elaboración propia.

Cada método listado en la tabla 3 relaciona una o más causas categorizadas como relevantes con sus respectivas actividades de mejoramiento, enfocando los esfuerzos principalmente en tareas preventivas antes que correctivas.

Fase de control:

En síntesis, se recomienda que, para las diferentes medidas de mejora propuestas, tanto para las comunes como para las específicas, se haga un seguimiento mediante auditorías de control para verificar la implementación y la efectividad de las medidas adoptadas. El éxito de estas medidas estará fuertemente ligado al compromiso de todos los involucrados, lo cual implica una adhesión a estas acciones en forma transversal de todo el equipo de proyecto, esto requiere el alineamiento y apoyo de la dirección, la supervisión, los departamentos de construcción y calidad, así como de los ejecutantes de la actividad, definidos como el personal de tubería y soldadura.

Es importante anotar que las auditorías o inspecciones de control deben hacerse en lapsos de tiempo lo más corto posible, en términos ojalá de semanas, para que se pueda evaluar de manera oportuna si las medidas realmente se están implementando y si están siendo efectivas. De lo contrario redireccionar los esfuerzos con miras a promover la implementación real de las medidas o cambiarlas según sea el caso, debería ser el siguiente paso.

DISCUSIÓN

El uso de la metodología DMAIC del enfoque Six Sigma en el caso de estudio objeto de la presente investigación implicó la revisión y consulta de la misma metodología desde el punto de vista procedimental, así como el entendimiento desde el punto de vista técnico de la soldadura GTAW y de las particularidades específicas del caso. El análisis de todo el conjunto permitió identificar los defectos críticos y medidas de mejora de una forma metodológica y secuencial. Para el caso específico aquí estudiado fueron encontrados como defectos críticos la porosidad y la falta de fusión destacando que, aunque son tipos de defectos diferentes, tienen causas comunes inherentes al proceso GTAW y las características del proyecto, por tanto, las medidas de mejora sugeridas deberían dar resultado para los dos tipos de falla en lo concerniente a Mano de Obra y Medición. Se resalta como hallazgo que si bien la habilidad, experiencia y compromiso del personal ejecutante es determinante, como era de esperarse al ser un proceso manual, por su parte

la Medición, relacionada con el tiempo de ejecución y extensión de la inspección por radiografía ejerce una influencia relevante.

Para el caso específico de la porosidad, se afirmó que el medio juega un papel importante por cuanto la lluvia y el viento estarían impidiendo que el Argón cumpla su rol de protección en el proceso. Por su parte para la falta de fusión, se postuló que las variables eléctricas, así como un inadecuado armado de la junta sumado a la falta de pericia del soldador provocarían que no se logre fusión completa entre el metal base y el metal de soldadura. En consecuencia, se sugirieron medidas de mejora específicas en ambos casos.

La medición del éxito por la aplicación del enfoque en la reducción del reproceso y por ende en el sobre costo de este tipo de proyectos debe ser evaluado de acuerdo con lo establecido en la fase de control, lo cual está fuera del alcance de esta investigación, e implicaría entre otras, la determinación del número Sigma antes y después de la implementación de las medidas. En todo caso, la eficacia de las acciones dependerá de la rigurosidad en la aplicación de las medidas propuestas, el compromiso y alineación de los involucrados con las mismas.

CONCLUSIONES

A través de la presente investigación se comprueba que el enfoque Six Sigma puede ser aplicado de manera práctica como alternativa de tratamiento en búsqueda de la disminución de sobre costo asociado al reproceso por soldadura GTAW en un proyecto de construcción de una caldera de potencia ensamblada bajo ASME SECC I, al permitir el análisis del problema de una forma sistemática y metodológica.

Las características de la metodología DMAIC en cuanto a su simplicidad permitieron abordar el problema de investigación con relativa facilidad permitiendo identificar las causas más relevantes del reproceso y en consecuencia enfocar los esfuerzos de análisis. En cuanto al proceso GTAW se confirma que, al ser un proceso de arco eléctrico manual con protección gaseosa, las variables relacionadas con la habilidad del soldador, las características eléctricas y el gas de protección influyen directamente en la aparición de defectos.

Siendo evidente que el sobre costo en un proyecto similar al acá analizado tiene una relación directamente proporcional con los defectos de soldadura a ser reparados por el impacto económico que implica el consumo de materiales y horas hombre adicionales asociados al reproceso de intervenir nuevamente las uniones soldadas para corregir las fallas, se encontró que

los principales actores en este proceso, para el presente caso de estudio son la porosidad y la falta de fusión, acumulando aproximadamente el 80% de las fallas.

Del análisis mediante diagramas causa-efecto se identificó que los dos tipos de defectos mencionados anteriormente tienen causas comunes y por tanto medidas de mejora tendrían una influencia simultánea en los dos tipos de defecto. En tal sentido fueron propuestas acciones relacionadas con la Mano de Obra y la Medición, donde se sugirieron esfuerzos encaminados a asegurar una alta competencia y compromiso del personal ejecutante de la labor, pero además una inspección radiográfica oportuna y ajustada al código de construcción, sugiriendo como opción conveniente a evaluar el uso de la técnica de ultrasonido.

Con respecto a la porosidad se establecieron lineamientos para proteger el área de soldadura y asegurar el correcto flujo de Argón a efectos de mantener su correcta función en el proceso. En el caso de la falta de fusión, se dispusieron lineamientos para que las variables eléctricas de corriente y tensión, así como el armado de la junta sean los adecuados.

REFERENCIAS

Anderson, N. & Kovach, J. (2014). Reducing Welding Defects in Turnaround Projects: A Lean Six Sigma Case Study. [Reduciendo Defectos de Soldadura en proyectos de Parada de Planta]. *Quality Engineering*. 26(2), 168–181.

American Society of Mechanical Engineers. (2021). Rules for Construction of Power Boilers. (Section I BPVC), [Reglas para la Construcción de calderas de potencia]. The American Society of Mechanical Engineers.

American Welding Society. (2008). *Visual Inspection Workshop*. [Taller de Inspección Visual]. Reference Manual: 4th ed. American Welding Society Educational Services.

Aris, T., Purba, H. & Nindiani, A. (2020). Consistency of Dmaic Phases Implementation on Six Sigma Method in Manufacturing and Service Industry: A Literature Review. [Consistencia de la implementación de las fases DMAIC en el método Six Sigma en la industria

manufacturera y de servicios.] *Management & Production Engineering Review (MPER)*, 11(4), 34–45.

Cyril, A., Venkatesan., D. & Noorullah, A. (2020). *Reduction of Welding Rework in T23/P23 and T91/P91 Boiler Panels*. [Reducción de reproceso de soldadura en paneles de Caldera T23/P23 y T91/P91]. *International Journal of Innovative Research*, 9 (9), 8237–8245.

Jenney, C., & American Welding Society. (2001). *Welding Handbook*. [Manual de Soldadura]. Vol. 1 9th ed. American Welding Society.

Bharathi, S.K., Vinodh, S., Devarapu, S. & Siddhamshetty, G. (2017). Application of Lean approach for reducing weld defects in a valve component: a case study. [Aplicación de enfoque Lean para reducir defectos de soldadura en un componente de válvula: estudio de caso]. *International Journal of Lean Six Sigma*, 8(2), 181–209.

Leisner, J. (2017). *Bring the heat to address welding errors: Avoiding 6 common mistakes reduce costs, improve productivity*. [Dando lo mejor para abordar errores en soldadura: Evitando 6 errores comunes reduzca costos, mejore productividad]. *Plant Engineering*, 71(4), 53–56.

Love, P., Smith, J., Ackermann, F., Irani, Z., & Teo, P. (2018). *The costs of rework: insights from construction and opportunities for learning*. [El costo del retrabajo: perspectivas de construcción y oportunidades por aprender]. *Production Planning and Control*, 29(13), 1082-1095–1095.

Mitru, A., Mitru, M., & Semenescu, A. (2020). *Research on the Comparative Analysis of Procedural Differences between Manual Gtaw Welding and an 8-Axis Adaptive Robotic*

System Gtaw Welding on Specific Samples. [Investigación sobre el Análisis Comparativo de las diferencias procedimentales entre Soldadura Manual GTAW y un Sistema GTAW Adaptivo Robótico de 8 Ejes sobre muestras específicas]. *Nonconventional Technologies Review / Revista de Tehnologii Neconventionale*, 24(4), 2–6.

Shinde, M., Inamdar, K. (2014). *Reduction in TIG welding defects productivity improvement using Six Sigma*. [Reducción en defectos de soldadura TIG, mejora de productividad usando Seis Sigma]. *International Journal of Technician Research and Application*, 2 (3), 100-105.

O'Brien, A., & American Welding Society. (2004). *Welding Handbook*. [Manual de Soldadura] Vol. 2 9th ed. American Welding Society.

O'Brien, A., & American Welding Society. (2015). *Welding Handbook*: [Manual de Soldadura] Vol. 5 9th ed. American Welding Society.

Rezaei, A., Ehsanifar, M., & Wood, D. (2019). *Reducing welding repair requirements in refinery pressure vessel manufacturing: a case study applying six sigma principles*. [Reduciendo requerimientos de reparación de soldadura en manufactura de recipientes a presión en refinería: un caso de estudio aplicando principios Seis Sigma]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13(3), 1089–1102.

Yousaf, F. (2014). *Reduction in Repair rate of Welding Processes by Determination & Controlling of Critical KPIVs*. [Reducción in rata de reparación de procesos de soldadura por Determinación y Control de KPIV Críticos.] *International Journal of Production Management and Engineering (IJPME)*, 2(. 1), 23–36.