

# Marco de Referencia para el Modelado Matemático de una Soldadura GTAW

Homero Roldán Rubio, Master in Science and Technology  
CIATEQ A.C., México, [homerorr@ymail.com](mailto:homerorr@ymail.com), [homero.rolan@ciateq.edu.mx](mailto:homero.rolan@ciateq.edu.mx)

Mentor: Guillermo Ernesto Frades Castedo, Doctor  
CIATEQ A.C., México, [gfrades@ciateq.mx](mailto:gfrades@ciateq.mx)

*Resumen– La soldadura es utilizada en todo el mundo y casi en cualquier proceso industrial, sería difícil voltear y no ver un objeto que fue soldado, pero esta tecnología, por lo general, se ve desde un punto de vista empírico, o en base a la experiencia adquirida por el maestro soldador. Un planteamiento de un marco de referencia para el estudio de la soldadura que describe el proceso es importante porque ofrece un punto de partida para el modelado matemático de la misma y nos permite discernir cuál es el camino que se tomará para su estudio.*

*Palabras Clave- Soldadura, Modelado, Matemáticas, GTAW, TIG.*

## I. INTRODUCCIÓN

La soldadura es la técnica utilizada para la unión de piezas metálicas u otros materiales entre los que figuran los plásticos, por lo general a través de la aplicación de calor. Esta técnica fue descubierta mediante un estudio de cómo manipular el hierro así como otros metales en formas útiles [1, 2]. Otra forma de entender la soldadura es como un proceso en el que los materiales del mismo tipo o clase fundamental se reúnen, para unirse y convertirse en uno, a través de la formación de enlaces químicos primarios, ocasionalmente secundarios bajo la acción combinada de calor y presión [3, 4, 5].

Las primeras espadas soldadas se desarrollaron en el primer milenio de nuestra era, entre ellas las más famosas fueron producidas por armeros árabes en Damasco, Siria, y esto se considera como una de las primeras aplicaciones de la soldadura. En tiempos modernos la mejora en las técnicas de producción de hierro, sobre todo la introducción de hierro fundido, ya no restringe la soldadura al trabajo del herrero y el joyero. Las nuevas técnicas de soldadura, fueron desarrolladas al no tener una forma de soldadura entre materiales, tales como la fijación mediante tornillos o remaches, y se aplican ampliamente a los nuevos productos, tales como los puentes, los motores de ferrocarril y utensilios de cocina., entre otros.

Los procesos modernos de soldadura por fusión son una consecuencia de la necesidad de obtener una unión continua de placas de acero u otros materiales. El remachado había demostrado tener desventajas, especialmente para recipientes cerrados tales como calderas y objetos sometidos a altas

presiones. Las nuevas técnicas de unión, como la soldadura fueron creadas con el empleo de gas de protección, como por ejemplo, para la soldadura por arco eléctrico y la soldadura por resistencia, todas ellas desarrolladas en el siglo XIX. El gran avance en este proceso se llevó a cabo en el año de 1916 con la implementación de la soldadura por Oxiacileno, los avances posteriores fueron en términos de equipo y seguridad. La soldadura por arco eléctrico ocupaba al principio un electrodo consumible que fue perfeccionado en el año de 1907. Esta soldadura tenía como desventaja que formaba soldaduras quebradizas y fue utilizada de manera generalizada hasta la primera guerra mundial, cuando era necesario la construcción de buques, equipos de trasportación y estructuras en un corto tiempo [1].

El proceso GTAW, conocido como soldadura de arco eléctrico con gas de protección y electrodo de tungsteno o wolframio, que es una soldadura en la que se genera un arco eléctrico que permite realizar el proceso de soldadura alcanzando el punto de fusión [5, 6], siendo implementada en la década de los 40 para realizar soldadura por fusión. En el año 1948 se desarrollaron procesos utilizando electrodos por un cable consumible que sirve de material de aporte para la soldadura. Más recientemente se desarrolló la soldadura láser la cual emite un haz concentrado sobre el material base para realizar la soldadura, de igual forma se han implementado otros procesos de estado sólido para la unión de materiales [1, 2, 4].

La soldadura se puede clasificar en dos ramas: Soldadura por fusión y soldadura en estado sólido.

La soldadura por fusión es un proceso que utiliza el calor para fundir el metal base. En diversas operaciones de soldadura por fusión, se añade un metal de relleno fundido a la piscina de soldadura para facilitar el proceso, el cual proporciona fuerza a la unión soldada. Una operación de soldadura por fusión en la que no se añade metal de relleno, se conoce como soldadura autógena. La categoría de fusión incluye los procesos más utilizados para soldar, que se pueden organizar en los siguientes grupos generales cuyas siglas en paréntesis son denominaciones de la American Welding Society [2, 3, 4]:

13<sup>th</sup> LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”

July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

- Soldadura por Arco (AW): Se refiere a un grupo de procesos de soldadura en el que el calentamiento de los metales se realiza por un arco eléctrico. En algunas operaciones de soldadura por arco también se aplica presión durante el proceso y la mayoría de ellas utilizan un metal de relleno.
- Soldadura por Resistencia (RW): En la soldadura se logra coalescencia usando el calor de resistencia eléctrica para el flujo de una corriente que pasa entre las superficies de contacto de dos partes se mantienen juntas bajo presión.
- Soldadura Autógena u Oxi soldadura (OFW): Estos procesos de unión usan gases como el oxígeno y acetileno que pueden servir para la fusión o el corte, para producir una llama caliente para fundir el metal base, así como el de relleno si es necesario su uso.
- Soldadura Láser (LBW): Es un proceso que utiliza la energía aportada por un haz láser para fundir y recrystalizar el material o los materiales a unir, obteniéndose la correspondiente unión entre los elementos involucrados.
- Soldadura por haz de Electrones (EBW): Es un proceso en el que se aplica un haz de electrones de alta velocidad para unir dos materiales. Las piezas de trabajo funden y fluyen juntos como la energía cinética de los electrones, ésta se transforma en calor al momento del impacto, lo cual permite la fusión.

La soldadura en estado sólido es el tipo de soldadura que se refiere a los procesos de coalescencia, en los cuales la fusión proviene de la aplicación de presión solamente, o una combinación de calor y presión. Si se usa calor, la temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar. No se utiliza un metal de aporte en los procesos en estado sólido. No se utiliza metal de relleno. Entre los procesos de soldadura representativos de este grupo se tienen:

- Soldadura por Difusión (DFW): Dos superficies se mantienen juntas bajo presión a una temperatura elevada y las partes se aglutinan por difusión en estado sólido
- Soldadura por Fricción (FRW): La coalescencia se logra por el calor de fricción entre dos superficies.
- Soldadura por Ultrasonido (USW): Se aplica una presión moderada entre las dos partes y se utiliza un movimiento oscilante a frecuencias ultrasónicas en una dirección paralela a las superficies de contacto. La combinación de las fuerzas normales y vibratorias resultando en esfuerzos cortantes que eliminan películas superficiales y consiguen la unión atómica de las superficies.

En este trabajo nos enfocaremos en la soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) que es una soldadura por arco eléctrico por medio de un electrodo no consumible, con protección por medio de gas inerte usualmente es una combinación de gases que incluye argón o helio. Como una ventaja a considerar en esta soldadura es que permite o no el uso de material de aporte de igual forma permite la soldadura de materiales heterogéneos, esta soldadura tiene otros nombres con los que se conoce son el TIG (Tungsten Inert Gas) con en la Fig. 1 y el WIG (Wolfram Inert Gas) usado en Europa dado que el tungsteno es llamado en Europa wolframio (W). Cuando el material de aporte es utilizado, es añadido a la piscina de soldadura desde una varilla o alambre, que es derretido por medio del calor generado en el arco eléctrico, en lugar de ser transferido por medio del electrodo consumible que funge como material de aporte en una gran variedad de procesos de soldadura por arco como lo es la GMAW. El tungsteno resulta ser un buen material para el electrodo dado su alto punto de fusión que es de 3410° C.

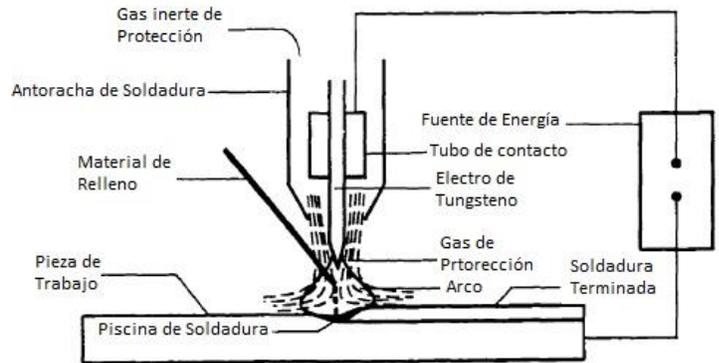


Fig. 1 Soldadura GTAW

Los soldadores expertos [7] saben que para diversas aplicaciones de soldadura GTAW, como en la Fig. 2, se busca crear una delgada línea de unión entre materiales en un estado fundido a los materiales base sin afectar la estructura y propiedades de las piezas originales. Para encontrar los parámetros óptimos de la soldadura, donde el calor no es demasiado alto o demasiado bajo, se deben analizar y controlar diversas variables.



Fig. 2 Ejemplo de Soldadura GTAW

## II. MODELO MATEMÁTICO

Los modelos matemáticos de la realidad son una forma de representar, por medio de artificios matemáticos, para explicación de fenómenos físicos [8]. Esencialmente, cualquier cosa presente en nuestra realidad se puede modelar, ya sea que se quiera expresar un evento físico, social o biológico, para la descripción de la acción de la naturaleza, la tecnología aplicada y de igual forma la intervención humana, es objeto del análisis realizado por medio de los modelos matemáticos, siempre y cuando estos puedan ser descritos por medio de expresiones matemáticas. La optimización dinámica, así como la teoría de control hacen uso extensivo de las mismas, siempre buscando un entendimiento del proceso [9-11].

Hay dos formas de clasificar los modelos matemáticos, si se busca vincularlos con el método científico, la primera sería, según [12], en el entendimiento del comportamiento de un fenómeno y la segunda sería para predecir o proporcionar una conjetura del comportamiento de un sistema real o como este fenómeno se comportará bajo situaciones de estrés.

Antes de crear un modelo matemático, se necesita pensar con detenimiento porqué es necesario el modelo o qué va a describir dicho modelo, ¿Qué preguntas vamos a responder con él?, las preguntas de investigación deben de ayudar a describir el fenómeno que se presenta o se busca comprender, para ello se delimita el sistema por medio de condiciones de frontera al igual que condiciones iniciales y solo se utilizan las variables importantes para el sistema, obviando algunas de ellas, es decir, el modelo se busca que sea simple, pero a la vez confiable y concreto, Fig. 3.

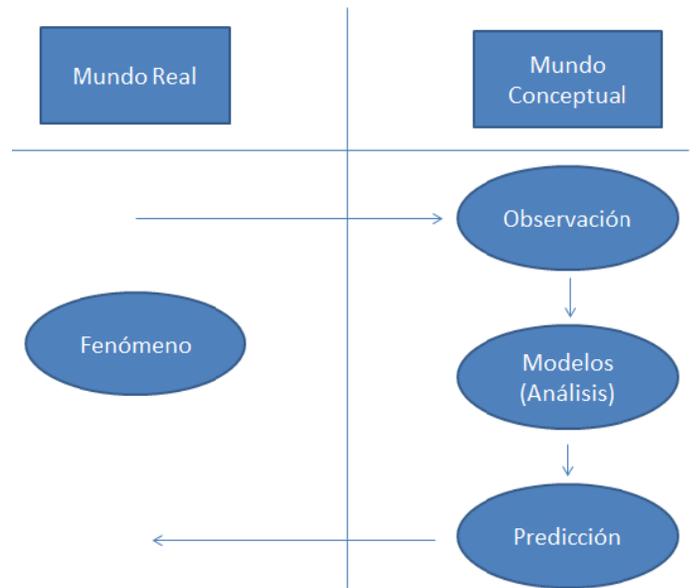


Fig. 3 Método Científico y principio de la modelación matemática.

Uno toma un modelo como herramienta para el desarrollo científico. Un modelo representa una hipótesis acerca del sistema estudiado y nos permite comparar los datos con la hipótesis planteada. Un modelo puede ser más útil si el mismo no se ajusta a los datos experimentales, porque esto nos dice que algunas de las ideas planteadas no son correctas. Los modelos matemáticos y simulaciones por computadora son herramientas experimentales útiles para construir y probar teorías al igual que a dar conjeturas sobre las misma. Siempre evaluando de una manera cuantitativa, para de esta forma, responder preguntas específicas, determinando la sensibilidad en los cambios de los parámetros y la estimación de las variables con mayor peso para el fenómeno a ser modelado.

### A Partes del Modelo

Las variables representan lo desconocido o las partes que cambian dentro del modelo, es decir, cuando se toma una decisión o cuando no se realiza la misma, que cantidad de producto se producirá en una línea, el espesor de una viga en el diseño de un techo, el calor necesario para fundir un material de manera óptima, una función incógnita en una ecuación diferencial en derivadas parciales, un operador desconocido en alguna ecuación en espacios de dimensión infinita que son ocupadas para poder formular los espacios cuánticos, entre muchos otros ejemplos. Para nuestro trabajo se presentan las siguientes variables como posibles para el mismo

- Clasificación del electrodo
- Diámetro del electrodo
- Tipo de gas de protección
- Volumen del gas de protección

- Corriente del arco
- Voltaje del arco
- Longitud del arco
- Velocidad de desplazamiento
- Amperaje
- Frecuencia
- Tipo de corriente
- Grosor de placa
- Material base
- Material de aporte
- Alimentación del material de aporte

El valor de estas variables está directamente vinculado al proceso a realizar, tal es el caso de la soldadura por filete de acero inoxidable en el cual se recomienda como gas de protección el argón, una corriente de soldadura de 80 a 120 amperes, al igual que un electrodo de torio.

Estas variables tienen un comportamiento estocástico, es decir, si el modelo buscara ser más preciso, se analizarán las variables de manera puntal para que estas se ajusten a una distribución probabilística adecuada. Al añadir este factor a cualquier ecuación la convierte en un proceso estocástico, que complica la solución del mismo. La inclusión del tiempo en cada variable nos permite ver la evolución de la misma a lo largo de un periodo de tiempo. Para simplificar los modelos de este tipo se toman únicamente las variables con mayor significancia para el modelo.

Ya que se han definido las variables adecuadas para el modelo matemático, se tiene que buscar una relación directa o indirecta entre ellas, para todo fenómeno que se quiera modelar, para esto existen herramientas matemáticas que ayudan a resolver este tipo de problemas como el diseño de experimentos [13], que es un conjunto de técnicas activas que manipulan el proceso para inducirlo a proporcionar la información que se requiere para mejorarlo. Son técnicas estadísticas y de ingeniería que permiten lograr la máxima eficacia de los procesos de producción a un menor costo. Trabajos referentes al diseño de experimentos como el caso de Srinivasa et al. [14] que lo desarrollan para una soldadura GMAW (Gas Metal Arc Welding), Giridhamra y Murugan en [15] lo utilizan para optimizar un proceso de soldadura GTAW pulsado. Nuevamente Murugan, pero ahora con Kannan, [16] analizan los efectos de una soldadura FACW (Flux cored arc welding) sobre acero dúplex, Zhang et al. [17] presentan un diseño para el ajuste de las variables soldadas por resistencia. Ghosal y Chaki [18] realizan una optimización de una soldadura híbrida GMAW-Láser.

Las variables en todo modelo matemático se deben ajustar a las ecuaciones que gobiernan su comportamiento, para poder observar cómo las variables se relacionan entre sí, un conjunto de varias relaciones crean un sistema de ecuaciones, que describe el comportamiento general de un

fenómeno apegado a la realidad, las variaciones que se presentan en el modelo permite un análisis del fenómeno que se modela.

Es resto de los parámetros que no influyen significativamente en el fenómeno, no se consideran variables y se les asignan valores numéricos fijos y toman el nombre de constante, necesarios para el entendimiento y solución de un modelo matemático, reciben el nombre de datos y usualmente se entienden como variables constantes para el fenómeno o que las mismas no afectan el entendimiento del mismo. Cabe notar que los datos son necesarios y no deben de ser despreciados, dado que al despreciarlos se corre el riesgo de obtener un modelo que no se ajuste a la realidad.

Sin embargo hay situaciones en la que algunas variables son descartadas y esto se debe esencialmente a la falta de técnicas adecuadas para la solución del problema o inclusive la complejidad de la misma aun con métodos numéricos. De igual forma, hay entidades matemáticas para las cuales no hay solución o prueba que demuestre su inexistencia.

### *B Tipos de Modelo para la soldadura*

La soldadura por arco eléctrico tiene tres partes, la primera es la que está relacionada al electrodo por parte de Goodazari [19] en donde se plantean ecuaciones que describen la relación del electrodo y su arco, dado en coordenadas polares, se asume simetría en el eje. El cálculo del dominio contiene al ánodo en una región del arco y el cátodo, así como la envoltura del cátodo y el ánodo en GMAW y, en GTAW, se considera como un sistema estacionario, que tiene simetría cilíndrica y que el eje del arco existe.

El tamaño del electrodo a ser usado es determinado por la corriente requerida para soldar el material base, La función del electrodo en este proceso es únicamente la de mantener el arco sin aportar metal al baño de fusión. Por este motivo, y para evitar su desgaste, es muy importante que posea una alta temperatura de fusión, además de poseer una buena capacidad de emisión de electrones. El tungsteno [6,7] es el metal que posee el mayor punto de fusión (3410°C) e igualmente posee una excelente capacidad de emisión de electrones, por lo que constituye el material primario en este tipo de electrodos. En la fig. 4 se muestran diversos tipos de acabado en la cabeza del electrodo que tiene una relación directa con la corriente.

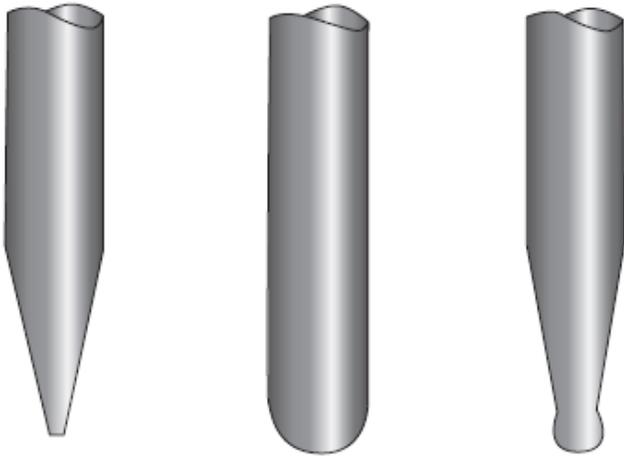


Fig. 4 Terminación de la cabeza de Electrodo.

La identificación de los electrodos de tungsteno se basa en su composición química y está regida por la norma AWS A 5.12, la que se muestra en la tabla I. Las características del electrodo y su composición llegan a ser un factor para el uso de algún tipo de corriente, así como el material base y el tipo de punta recomendado para el mismo.

TABLA I  
NORMA AWS A 5.12.

Composición				
Identificación AWS	Óxido adicionado		Tungsteno mínimo (%)	Color de Identificación
	Naturaleza del óxido	%		
EWP	-	-	99.5	Verde
EWTh-1	ThO <sub>2</sub>	0.8 – 1.2	98.3	Amarillo
EWTh-2	ThO <sub>2</sub>	1.7 – 2.2	97.3	Rojo
EWZr-1	ZrO <sub>2</sub>	0.15–0.40	99.1	Marrón
EWLa-1	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9 – 1.2	98.3	Negro
EWCe-2	CeO <sub>2</sub>	1.8– 2.2	97.3	Naranja

Un modelo para el electrodo está dado por Haidar [20], que plantea las ecuaciones que describen la relación del electrodo y su arco.

La segunda parte está dada por el arco eléctrico que funge como fuente de energía y la calidad de la soldadura, depende del calor y de la corriente eléctrica dada por el arco, según Godzari, [19], la definición del arco puede estar dada como la descarga eléctrica de dos electrodos, ánodo y cátodo,

en una fase gaseosa, en el cual el voltaje tiene una caída en el cátodo para lograr una excitación del potencial presente en el vapor del electrodo y la densidad de corriente. Se ha demostrado que la corriente eléctrica a lo largo del arco no tiene una distribución uniforme. Trabajos análogos sobre el tema son tratados por Hedar en [20], Krivtsun y et al. [21,22] en donde plantean un modelo del arco eléctrico en dos dimensiones, restringiendo de esta manera las condiciones de frontera suponiendo simetría, Huang et al. en [23], expresan que es un modelo auto-consistente en tres dimensiones del arco de soldadura, Kwon y Weckman en [24] realizan un modelo analítico de la conducción térmica de una soldadura de arco de dos caras (DSAW, Double Sided Arc Welding), Lee et al. en [25] realizan un estudio de las fuerzas electromagnéticas necesarias para el estudio del arco eléctrico. Un modelo matemático similar al anterior que comprende el efecto del arco y de la piscina de soldadura es revisado por Faraji et al. [26] que plantea dos dimensiones, en este caso es el de una soldadura GTAW estacionaria, Lu et al. en [27] muestran que el comportamiento del arco está vinculado al gas de protección. El control de arco es tan importante que es un tema de estudio hecho por Kodama et al. en [28], mientras tanto Tanaka et al. proponen un modelo unificado de una soldadura GTAW estática [29].

La tercera parte está dada por la transferencia de calor en el material y cómo esta afecta la estructura, así como la afectación microestructural del mismo. Para ello se dividirá el material base de una soldadura en dos partes, la primera es la zona fundida que está compuesta del material fundido, que se ha sometido durante el proceso de fusión a una serie de transformaciones físicas, químicas y microestructurales. La otra es la zona afectada por el calor donde se tienen cambios en estado sólido y se encuentra alrededor de la zona fundida. Riahi y Nazari muestran en [30] un enfoque al problema del modelado de soldadura por medio del problema inverso para la transferencia de calor en una placa metálica soldada por fricción, por la ley de transferencia de Fourier dadas por las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_{\text{int}} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$c\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Donde  $T$  es la temperatura, expresada en coordenadas cartesianas  $xyz$  con respecto al tiempo  $t$ . Otros autores, [31,32], que utilizan las ecuaciones o variaciones de las mismas [31], sin embargo en [33] Yousef, Taha y Shehab describen el desarrollo de un modelo de computadora utilizado para analizar el flujo de calor, durante la soldadura láser pulsado con Nd: YAG, igualmente Sharma et al. [34],

muestran que la forma de distribución de calor del arco eléctrico esta definida por medio de una doble elipse como se muestra en la Fig. 5.

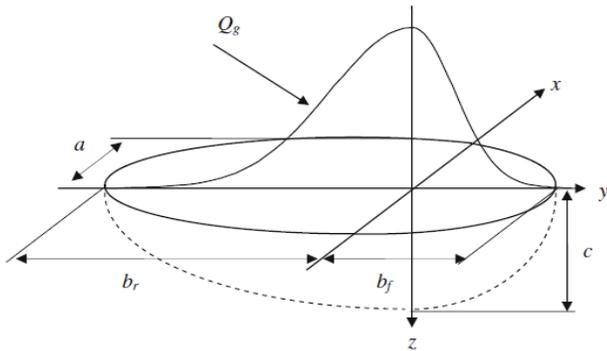


Fig. 5 Diagrama de Doble Espiral.

Donde el cono elíptico tiene una distribución de potencia gaussiana en el plano  $xz$  y una distribución lineal en la dirección  $y$  y de la profundidad. El parámetro  $\beta$  representa la contribución relativa de las dos fuentes de calor, donde la parte frontal en el doble elipsoide  $q_e(x, y, z)$  se define como la ecuación (3) y (4), igualmente son utilizadas por Haldar [21]

$$q_e(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_{ef}Q}{a_e b_e c_{er} \pi^{3/2}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a_e}\right) \exp\left(-3\frac{y^2}{b_e}\right) \exp\left(-3\frac{z^2}{c_{er}}\right) \quad (3)$$

y la parte posterior, más ancha, como sigue

$$q_e(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_{ef}Q}{a_e b_e c_{er} \pi^{3/2}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a_e}\right) \exp\left(-3\frac{y^2}{b_e}\right) \exp\left(-3\frac{z^2}{c_{er}}\right) \quad (4)$$

En [14] se presenta la ecuación de Green para la difusión del calor mostrada en la ecuación (5)

$$\lambda \nabla T + \nu \rho \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{2x}{h}(T - T_o) + \frac{q_2}{h} \quad (5)$$

### III. PLANTEAMIENTO

La idea principal o vértice central para la concepción de un modelo matemático, es que toda ecuación que se utilice debe ser dimensionalmente homogénea o su dimensión debe de ser constante, esto es lógico en el sentido de las unidades si se está trabajando con ecuaciones energéticas, el resultado debe estar dado en términos de las unidades referentes a la energía, de forma análoga cuando se realiza el balance de masa o el cálculo de la transferencia de calor. Este estudio

comprende el área de las matemáticas conocida como Análisis Dimensional.

Otro de los pilares de un modelo matemático es la elección de un nivel apropiado de detalle para estudiar el problema en cuestión, esto nos dará la forma adecuada para diseñar el modelo matemático. Este proceso se llama abstracción, por lo general requiere un enfoque reflexivo para identificar los fenómenos sobre los que se desea enfocar el modelo, es decir, se necesita responder la pregunta fundamental del ¿Por qué se busca o se desarrolla un modelo?

Como complemento a esto, cuando se busca un nivel adecuado de abstracción o de detalle, se indaga simultáneamente la métrica o escala que se utilizará para medir el modelo que se ha desarrollado y, no es lo mismo trabajar con un edificio a estudiar un cordón de soldadura. La noción de escala incluye varias ideas; los efectos de la geometría en la escala, la relación de la función o funciones con respecto a la escala, así como la determinación de los límites del modelo, los cuales son necesarios para elegir una métrica adecuada para el modelo en relación a la realidad que se quiere modelar o analizar. Lo anterior permitirá enfatizar, minimizar o, inclusive, despreciar ciertos elementos que afectan el modelo, de acuerdo al fenómeno. Hay afecciones que se desean conservar y otras que generan ruido sobre el modelo, afectando la precisión y la información que este brindada.

Como se vio en los párrafos anteriores, la abstracción del modelo no brinda información acerca del fenómeno que se presenta en la realidad, pero con ello la complejidad de un modelo matemático depende estrictamente de cómo se elabora y se plantea, la precisión de un modelo depende de la información con la que se alimenta el mismo, si se aumentan las variables a evaluar vinculadas con el fenómeno o la forma en la que se analizan las mismas, el modelo puede complicarse significativamente. Es importante decir que es casi imposible tomar en cuenta todas las variables que afectan un proceso o un evento, es por eso que la mayoría de las aplicaciones de los mismos se realizan bajo situaciones ideales, con esto se le llega a restar veracidad al modelo, pero muchas veces esta información es más que significativa para el mejoramiento o entendimiento de lo que se está modelando. Para ello se han aplicado varias áreas de la matemática como lo son las ecuaciones diferenciales, la lógica difusa, entre otras más.

### IV. CONCLUSIÓN

Separar la información de una forma adecuada permite un entendimiento adecuado del proceso, así como un análisis de las variables que afectan el modelado matemático, dado que ayudan a entender las variables que afectan cada parte de

la soldadura. Cada tipo de modelo nos brinda información independiente y diferente, que atacan los problemas de la soldadura como lo son las deformaciones del material debido al estrés o las microestructuras generadas en la zona afectada por el calor. Esto permite analizar qué técnicas se ajustan de una mejor manera al problema y cómo podemos responder a un problema tan específico como lo es la soldadura.

El trabajo permitió observar las variables a tratar para el desarrollo de un modelo matemático, que son, a consideración del autor, el tipo de corriente, amperaje, frecuencia, velocidad de desplazamiento y longitud de arco. Estas propiedades afectan en mayor o menor medida la zona afectada por el calor, creando soldaduras defectuosas y quebradizas, las cuales presentan un problema para la industria, ya que se requiere un tratamiento posterior o inclusive estas se llegan a desechar. Un modelado matemático adecuado del proceso permitirá reducir estos al menos en un 50%, logrando un mejor control de calidad de las piezas soldadas.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CIATEQ A.C. por el apoyo brindado para el desarrollo del trabajo de tesis doctoral, así como a CONACYT por el apoyo económico que está brindando para el estudio del mismo, al igual que a mí asesor de tesis el Doctor Guillermo Frades.

#### REFERENCIAS

[1] Welding, Britannica Encyclopaedia, <http://global.britannica.com/>  
 [2] M. Groover ROOVER M., *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 4th ed, 2010 John Wiley & Sons, Inc.  
 [3] D. Singh, *Fundamental of manufacturing Engineering*, CRC Press, First edition 2008.  
 [4] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, Prentice Hall, 2010.  
 [5] R. Messler, *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy*, 1999, John Wiley & Sons, Inc.  
 [6] S. Kuo, *Welding Metallurgy*, 2003 John Wiley & Sons, Inc  
 [7] T. Bridigum, “Juggling the variables of GTAW”, *The FABRICATOR*® December 2011.  
 [8] Mathematical model, Britannica Encyclopaedia, <http://global.britannica.com/>  
 [9] Numerical Analysis, Britannica Encyclopaedia, <http://global.britannica.com/>  
 [10] Burden, *Numerical Analysis*, Brooks/Cole Cengage learning, 2011.  
 [11] J. Mathews, *Numerical Methods Using MATLAB*, Pearson Prentice Hall, Fourth Edition, 2004.  
 [12] C. Dym y E. Ivey, *Principles of Mathematical Modeling*, 1st Edition, Academic Press, New York, 1980.  
 [13] H. Gutierrez. Y R. De La Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, Mc Graw Hill, Primera Edición 2004.  
 [14] P. Srinivasa et al., “Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding”, *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2009, 45:496–505  
 [15] P. Giridharan y N. Murugan, “Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets”, *International Journal of Advanced Manufacture Technology* (2009) 40:478–489  
 [16] N. Murugan y T. Kannan, “Effects of flux cored arc welding parameters on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel clad metals”, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2007, Vol. 42, No 1.  
 [17] P. Zhang et al., “Effects of welding parameters on mechanical properties and microstructure of resistance spot welded DP600 joints”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, Vol. 16, No. 7.

[18] S. Ghosal y S. Chaki, “Estimation and optimization of depth of penetration in hybrid CO<sub>2</sub> LASER-MIG welding using ANN-optimization hybrid model”, *International Journal Advanced Manufacture Technology*, 2010, 47:1149–1157  
 [19] M. Goodazari, *Modelling of Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Gas Metal Arc Welding (GMAW) Processes*, 1997, Department of Metallurgy and Materials, Science University of Toronto.  
 [20] J. Haidar, A Theoretical Model for Gas Metal Arc Welding, and Gas Tungsten Arc Welding, *Journal of applied Physics*, Vol. 84, No. 7 October 1998, 3518-3529.  
 [21] L. Krivtsun et. al., “Modelling of electromagnetic processes in system ‘welding arc–evaporating anode’ Part 1 – Model of anode region”, *Science and Technology of Welding and Joining* 2010 VOL 15 NO 6  
 [22] L. Krivtsun et. al., “Modelling of electromagnetic processes in system ‘welding arc–evaporating anode’ Part 2 – model of arc column and anode metal”, *Science and Technology of Welding and Joining* 2010 VOL 15 NO 6  
 [23] Y. Huang et. al., “Experimental Study on the Welding Residual Stresses of Integral Joint Using Full-Scale Joint Model of a Steel Truss Bridge”, *Advances in Structural Engineering* Vol. 16, No. 10, 2013.  
 [24] Y. Kwon y C. Weckman, “Analytical thermal model of conduction mode double sided arc welding”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008 VOL 13, NO 6.  
 [25] C. Lee et al., “Development of an automatic arc welding system using a variable structure model reference scheme”, *International Journal Advanced Manufacture Technology*, 2008, 35:978–986.  
 [26] A. Faraji et. al., “Experimental study and numerical modeling of arc and weld pool in stationary GTA welding of pure aluminum”, *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2014, 71:2059–2071.  
 [27] S. Lu, et al., “Numerical simulation for welding pool and welding arc with variable active element and welding parameters”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, VOL 14, NO 6.  
 [28] S. Kodama et al., “Arc sensor sensitivity in short circuiting metal active gas welding with high speed torch oscillation”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, VOL 11, NO 1.  
 [29] M. Tanaka et al., “A Unified Numerical Modeling of Stationary Tungsten-Inert-Gas Welding Process”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, VOL 33A, July 2002—2043.  
 [30] M. Raihi y H. Nazari, “Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation”, *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2011, 55:143–152.  
 [31] A. Lundback y H. Runnemalm, “Validation of three-dimensional finite element model for electron beam welding of Inconel 718”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, VOL 10, NO 6.  
 [32] H. Lee., C. Chen y J. Wu, “3D numerical study of effects of temperature field on sensitisation of Alloy 690 butt welds fabricated by gas tungsten arc welding and laser beam welding”, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, VOL 15, NO 7, 605.  
 [33] A. Yousef, Z. Taha, y A. Shehab, “Building A Simulation Model For The Prediction Of Temperature Distribution In Pulsed Laser Spot Welding Of Dissimilar Low Carbon Steel 1020 To Aluminum Alloy 6061”, *International Conference on advanced materials and processing technologies, AMPT 2010*.  
 [34] A. Sharma, “Estimation of heat source model parameters for twin-wire submerged arc welding”, *International Journal Advanced Manufacture Technology*, 2009, 45:1096–1103.

**13<sup>th</sup> LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”**

July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic