

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE SOLDADURA MEDIANTE UN ALGORITMO GENÉTICO. APLICACIÓN EN UN PROCESO ASISTIDO POR UN BRAZO ROBÓTICO

Luis Pérez P^{a*}, Fernando Olivares Z^a y Orlando Durán A^b

^a Departamento de Ingeniería Mecánica, CIMA*, Universidad Técnica Federico Santa María
Av. España 1680 – Valparaíso – CHILE, luis.perez@usm.cl,
fernando.olivares@alumnos.usm.cl

^b Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Av. Brasil 2950 – Valparaíso – CHILE, orlando.duran@ucv.cl

Palabras Clave: Algoritmo genético, Optimización, Parámetros de soldadura.

Resumen: En este trabajo se presenta la optimización de los parámetros de soldadura en probetas curvas usando un algoritmo genético y un modelo de segundo orden rotacional. Dichas probetas describen el perfil de un alabe de turbina Pelton.

El procedimiento consiste en la elaboración de una serie de ensayos dependientes de las variables a controlar en el proceso de soldadura. Una vez realizados estos ensayos se procede a la preparación de las muestras para su ataque químico el que permite visualizar la penetración, área del cordón y dilución. Posteriormente se efectúa la medición de la altura y ancho de los cordones de soldadura.

Lo anterior se emplea para obtener una regresión de segundo orden que entrega la función objetivo a optimizar en el algoritmo genético. El proceso de optimización se ha implementado con un algoritmo genético mediante el software MATLAB, y utilizando funciones especialmente programadas para la mutación, reproducción e inicialización debido a las restricciones propias del modelo estudiado.

Una vez finalizada la optimización, se han comprobado los resultados de ésta con la realización de nuevos ensayos, donde se ha verificado que las funciones objetivos describen de buena forma las características de los cordones de soldadura, arrojando errores que no superan el 6%.

1 INTRODUCCIÓN

El estudio consiste en realizar pruebas experimentales en probetas curvas, cuya forma es similar al perfil de un alabe de una turbina Pelton. Éstas son soldadas en forma asistida mediante un brazo robótico, variando los distintos parámetros que se quieren optimizar, entre éstos voltaje, velocidad de salida del material de aporte, velocidad de soldadura o de desplazamiento del robot, longitud de penduleo y caudal de gas.

Previo al proceso de soldadura en las probetas se debe programar el robot utilizando una estrategia del tipo punto a punto, teniendo como base el sistema de herramienta del dispositivo, con el fin de facilitar el desplazamiento de la torcha de soldadura a lo largo de la trayectoria curva de la probeta.

Una vez realizados los cordones de soldadura con todos los parámetros controlados, se procede a la preparación de las probetas la que consiste en dos etapas:

- La primera consiste en la realización de los cortes de las probetas en presencia de líquido refrigerante para evitar alteraciones en la estructura del cordón debido a la temperatura.
- La segunda etapa consiste en la preparación para el ataque químico con Nital al 5%, lo que permite la visualización de características, tales como, penetración, ancho del cordón y altura. La medición del área del cordón de soldadura se realiza a través del software AUTOCAD mediante una poli-línea sobre la fotografía del cordón de soldadura. Además, este proceso nos permite obtener el porcentaje de dilución presente en el éste.

Con los resultados de las mediciones obtenidas se realiza la regresión numérica de segundo orden. La obtención de los coeficientes en la regresión numérica permite representar las diversas funciones objetivo que se optimizan mediante el algoritmo evolutivo ([Xin She Yang, 2010](#)). El proceso de optimización se realiza a través del Toolbox Optimization de MATLAB, programando previamente una serie de códigos adaptando el modelo en cuestión ([Mathworks Global Optimization Toolbox User's Guide, 2012](#)).

Finalmente con los resultados de la optimización se procede a la validación del modelo realizando una serie de pruebas para comparar los resultados teóricos con los reales obtenidos, y así poder determinar el porcentaje de error que presenta el modelo.

2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el procedimiento se utiliza como metal base para la realización de los cordones de soldadura un acero estructural SAE 1020, que posee las siguientes propiedades químicas (Wegst C.W, 2004).

Acero	% Carbono	% Manganeso	% Fosforo	% Azufre
SAE 1020	0.18 – 0.23	0.30 – 0.60	0.04 Máximo	0.05 Máximo

Tabla 1. Composición química de acero SAE 1020.

Por otra parte el material de aporte utilizado corresponde a un electrodo de clasificación AWS: ER-70S-6 / ER-48S-6, de 1,2 [mm] de diámetro, que se caracteriza por su excelente soldabilidad con una alta cantidad de elementos desoxidantes para soldaduras donde no pueden seguirse estrictas prácticas de limpieza. La transferencia de metal de aporte se realiza mediante corto circuito por medio de un sistema MIG, el cual utiliza una mezcla de Argón con Dióxido de Carbono como gas protector, con un porcentaje 80/20 respectivamente (Manual de sistemas y materiales de soldadura Indura).

Las dimensiones de las probetas utilizadas corresponden a 300[mm]x50[mm]x5[mm], las cuales adoptan la forma curva por medio de una cilindradora para montarlas sobre una base de metal para facilitar la realización de las pruebas de soldadura mediante el brazo robótico tal como muestra la Figura 1.



Figura 1. Montaje de probetas curvas para la realización de cordones de soldadura.

El brazo robótico utilizado en el proceso es de marca KUKA modelo KR 125/2, el cual tiene incorporada una maquina de soldar marca ESS modelo Pulsarc 350.

La probeta estudiada se divide en tres tramos, debido a que la pendiente de la curva produce el derrame del material depositado, dando un mal aspecto al cordón. Esto se soluciona mediante la variación de los parámetros en cada tramo, quedando definidos los

siguientes límites y valores intermedios de codificación en la Tabla 2, para cada uno de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X_i = \frac{2(2X - (X_{Max} + X_{Min}))}{(X_{Max} - X_{Min})} \quad (1)$$

Donde X_i , corresponde al valor de codificación de cada parametro, X_{Max} y X_{Min} a los límites superior e inferior respectivamente mientras que la variable X adopta el valor de cada parametro de acuerdo a su codificación (Sudhakaran R, 2011).

Tramo N°1									
	Parámetro	Unidad	Límite Inferior	Límite Superior	-2	-1	0	1	2
X_1	Voltaje	[V]	85	90	85	86,25	87,5	88,75	90
X_2	Velocidad de soldadura	[m/min]	0,15	0,25	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25
X_3	Longitud de penduleo	[mm]	2	4	2	2,5	3	3,5	4
X_4	Velocidad del hilo	[m/min]	4	5	4	4,25	4,5	4,75	5
X_5	Caudal de gas	[Lts/min]	16	20	16	17	18	19	20

Tramo N°2									
	Parámetro	Unidad	Límite Inferior	Límite Superior	-2	-1	0	1	2
X_1	Voltaje	[V]	70	80	70	72,5	75	77,5	80
X_2	Velocidad de soldadura	[m/min]	0,15	0,2	0,15	0,1625	0,175	0,1875	0,2
X_3	Longitud de penduleo	[mm]	2	3	2	2,25	2,5	2,75	3
X_4	Velocidad del hilo	[m/min]	4	4,5	4	4,125	4,25	4,375	4,5
X_5	Caudal de gas	[Lts/min]	16	20	16	17	18	19	20

Tramo N°3									
	Parámetro	Unidad	Límite Inferior	Límite Superior	-2	-1	0	1	2
X_1	Voltaje	[V]	65	70	65	66,25	67,5	68,75	70
X_2	Velocidad de soldadura	[m/min]	0,15	0,2	0,15	0,1625	0,175	0,1875	0,2
X_3	Longitud de penduleo	[mm]	2	3	2	2,25	2,5	2,75	3
X_4	Velocidad del hilo	[m/min]	4	4,5	4	4,125	4,25	4,375	4,5
X_5	Caudal de gas	[Lts/min]	16	20	16	17	18	19	20

Tabla 2. Valores límites y de codificación del proceso de soldadura.

3 RECOPIACIÓN DE DATOS

La recopilación de datos se realiza a través de cada probeta ensayada de la matriz de diseño propuesta por Cochran y Cox, donde se extrae una muestra por tramo, para determinar la penetración, área, dilución, ancho y altura de los cordones, las cuales se aprecian en la Figura 2 (Cochran y Cox, 1990).

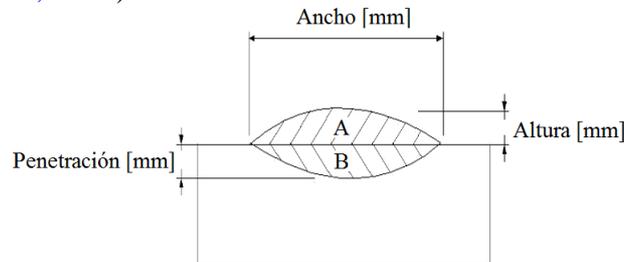


Figura 2. Características medidas de los cordones de soldadura.

El área total es medida en milímetros cuadrados y la dilución en porcentaje, donde se le asocian las siguientes fórmulas de acuerdo a la Figura 2:

$$\text{Área total} = A + B \quad (2)$$

$$\text{Dilución} = \left(\frac{B}{\text{Área total}} \right) * 100 \quad (3)$$

Mediante la obtención del área se determina la dilución, siendo esta última el cambio en la composición química del metal de aporte causado por la mezcla que ocurre con el metal base o bien con los cordones de soldadura previamente depositados en un proceso de recuperación de un elemento metálico.

Los valores obtenidos de las características de los cordones de soldadura en cada ensayo de la matriz de diseño de la Tabla 3, se adjuntan en la Tabla 4 según el tramo correspondiente.

Ensayo N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Ensayo N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	-1	-1	-1	-1	1	17	-2	0	0	0	0
2	1	-1	-1	-1	-1	18	2	0	0	0	0
3	-1	1	-1	-1	-1	19	0	-2	0	0	0
4	1	1	-1	-1	1	20	0	2	0	0	0
5	1	-1	1	-1	-1	21	0	0	-2	0	0
6	-1	-1	1	-1	1	22	0	0	2	0	0
7	1	1	1	-1	1	23	0	0	0	-2	0
8	-1	1	1	-1	-1	24	0	0	0	2	0
9	1	-1	-1	1	-1	25	0	0	0	0	-2
10	-1	-1	-1	1	1	26	0	0	0	0	2
11	1	1	-1	1	1	27	0	0	0	0	0
12	1	1	-1	1	-1	28	0	0	0	0	0
13	-1	-1	1	1	1	29	0	0	0	0	0
14	1	-1	1	1	-1	30	0	0	0	0	0
15	-1	1	1	1	-1	31	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	1	32	0	0	0	0	0

Tabla 3. Matriz de diseño propuesta por Cochran y Cox.

Tramo N°1					Tramo N°2					Tramo N°3			
Pe [mm]	An [mm]	Al [mm]	Ar [mm ²]	Di [%]	Pe [mm]	An [mm]	Al [mm]	Ar [mm ²]	Di [%]	Pe [mm]	An [mm]	Al [mm]	Ar [mm ²]
1,07	12,89	3,19	33,79	22,39	1,34	12,58	3,16	35,73	34,17	0,96	12,33	2,86	29,4
1,29	12,53	3,36	31,49	31,00	1,61	12,12	3,69	39,96	37,43	1,18	11,96	3,14	38,6
1,04	12,50	2,52	22,71	20,49	1,05	12,71	2,80	29,69	29,42	2,71	12,04	1,25	28,0
0,68	11,47	3,08	26,64	14,93	1,04	12,48	3,87	34,78	19,84	1,45	11,34	3,03	33,0
1,51	12,73	3,48	40,97	32,54	1,15	11,63	3,48	34,96	26,58	1,60	11,37	3,27	37,3
1,26	12,36	3,27	38,63	29,76	1,31	11,67	3,15	35,53	31,44	1,21	12,28	3,16	30,0
1,30	12,09	2,87	33,04	32,77	0,49	11,45	3,71	27,64	12,70	1,04	11,48	2,95	26,7
1,17	12,35	2,82	29,73	22,85	1,01	11,71	2,82	29,94	28,54	0,79	13,59	2,45	25,0
1,14	12,72	3,50	41,07	31,94	1,04	13,37	3,02	34,22	30,83	1,01	11,73	2,94	30,0
0,77	12,81	3,23	30,77	14,37	0,91	12,23	3,44	32,47	21,20	1,29	11,34	2,92	32,3
1,04	13,12	2,95	32,57	32,55	0,94	11,70	2,87	24,83	21,30	1,02	11,42	2,96	27,3
1,02	12,12	2,76	30,16	32,48	1,11	12,26	3,34	32,88	23,20	1,39	11,67	2,81	27,4
1,43	13,81	3,23	41,12	35,15	1,61	12,29	3,26	37,31	41,16	1,12	12,01	2,99	29,0
1,34	13,36	3,34	38,84	27,39	1,57	12,30	3,18	35,41	40,85	1,75	10,79	3,20	36,0
1,18	12,75	2,78	32,59	34,97	1,28	12,57	3,01	30,95	27,52	1,12	11,30	3,02	28,0
1,16	13,21	2,83	35,32	39,81	1,26	12,56	3,33	34,81	28,32	1,10	11,92	2,84	26,2
0,81	11,65	2,91	27,36	23,73	1,02	10,89	2,49	25,41	27,99	1,01	12,16	3,11	28,4
1,06	12,64	3,45	34,17	26,08	1,17	10,08	3,76	30,37	28,71	0,85	11,16	3,22	28,0
1,43	13,57	3,39	44,77	28,49	1,50	12,47	3,78	40,38	31,18	0,80	10,83	3,71	27,0
0,91	10,20	2,90	22,39	16,51	1,01	10,66	3,14	24,53	21,07	1,37	11,03	2,91	30,0
0,98	12,99	3,03	33,72	26,23	1,48	11,79	3,38	29,83	16,13	0,77	11,77	3,18	29,0
1,02	12,68	3,08	35,25	34,12	1,15	11,74	3,08	34,69	36,87	1,53	11,20	3,28	32,0
1,49	12,47	3,04	34,95	31,04	1,66	12,93	3,53	41,13	35,81	0,92	11,00	3,08	31,0
1,18	12,90	3,08	37,15	36,69	2,00	10,87	3,33	38,17	44,22	0,99	10,98	3,16	30,0
1,15	13,05	3,05	39,17	35,98	1,51	12,40	3,23	36,88	35,43	1,51	11,82	2,99	33,0
1,06	13,70	2,89	35,72	32,80	1,52	11,76	3,44	38,87	41,99	1,72	11,59	3,28	34,0
1,19	13,47	3,02	36,69	35,55	1,48	11,37	3,16	34,86	37,86	1,34	10,61	3,28	34,0
1,31	13,10	2,84	36,54	40,34	1,51	11,80	2,84	32,36	35,81	1,14	12,35	3,00	29,0
1,21	13,11	2,94	36,18	32,81	1,58	12,03	2,93	33,30	37,13	1,16	11,48	3,02	29,0
1,05	13,23	2,89	37,00	34,31	1,39	11,81	3,01	34,49	37,67	1,46	11,88	3,22	29,0
1,12	13,63	2,96	35,72	35,48	1,06	11,27	3,03	31,99	38,89	0,89	12,02	2,51	26,0
1,29	13,39	3,10	39,00	34,49	0,90	12,15	3,24	32,06	31,36	1,01	11,99	2,79	28,0

ores obtenidos de las diversas características estudiadas de los cordones de soldadura a partir de la matriz de diseño donde Pe corresponde a la penetración, An al ancho, Al a la altura, Ar al área y Di a la dilución del cordón de soldadura.

4 Obtención de función objetivo

La elaboración de las funciones objetivos se lleva a cabo con el software MATLAB, al generar un código que permite obtener los diversos coeficientes de las ecuaciones, por medio de una regresión realizada a los datos de cada característica de los cordones de soldadura de acuerdo a la Tabla 4. El procedimiento anterior se realizó con el complemento StatisticsToolbox, seleccionando la regresión de carácter no lineal (Mathworks, StatisticsToolbox, 2012). La ventaja de este tipo de regresión es que permite ingresar el desarrollo completo de la expresión número (4), correspondiente a la ecuación que describe el modelo de segundo orden rotacional (Cochran y Cox, 1990).

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

Una vez realizado el procedimiento anterior se comienza con la elaboración de las funciones objetivo, en donde cada una debe ser almacenada en un archivo de extensión .M con su respectiva identificación, con la finalidad de que este archivo sea utilizado en el proceso de optimización.

La optimización busca sacar el máximo provecho a los diversos parámetros de soldadura utilizados, por este motivo se busca la maximización de la ecuación objetivo. Lo anterior se consigue mediante la incorporación del signo negativo al comienzo de la ecuación objetivo.

Los coeficientes pertenecientes a cada función objetivo que describe las propiedades de los cordones de soldadura en cada tramo corresponden a los de la Tabla 5.

	Tramo N° 1				Tramo N° 2				Tramo N° 3				
	Ancho	Penetración	Área	Dilución	Altura	Ancho	Penetración	Área	Dilución	Altura	Ancho	Penetración	Área
	13,267	1,1828	36,896	35,307	3,0597	11,616	1,367	33,426	37,012	3,0422	11,642	1,1288	29,59
04	0,30407	0,064357	1,4646	0,88014	0,32927	-0,083184	0,025689	1,7923	0,31614	0,036893	-0,21736	-0,025115	-0,038
	-0,78593	-0,12814	-5,8329	-2,7024	-0,14823	-0,33318	-0,13431	-3,4102	-2,3914	-0,19061	0,082642	0,15739	0,4710
87	0,060686	0,095923	1,888	2,8409	-0,0304	-0,11515	0,0030744	0,70625	2,993	0,098244	0,046369	-0,025929	0,0513
587	0,26098	-0,032589	1,1928	2,3299	-0,072933	-0,074847	0,054426	-0,68792	0,85196	0,064256	-0,23304	-0,0057376	-0,591
956	0,10593	-0,024357	-0,6246	-1,0876	0,04073	-0,27932	0,014311	-0,054751	1,5039	0,063107	-0,090142	0,037615	0,2864
08	-0,23928	-0,052752	-1,564	-2,4579	-0,0021636	-0,19064	-0,10322	-1,571	-2,584	-0,023498	0,064513	-0,021338	-0,327
58	-0,30428	0,0059984	-0,86025	-3,0591	0,081586	0,07936	-0,063225	-0,42977	-3,1403	0,012752	-0,11799	0,017412	-0,260
58	-0,066778	-0,036502	-0,634	-1,1404	0,024086	0,12936	-0,048225	-0,47852	-3,0465	-0,0072484	0,020763	0,033662	0,2008
08	-0,10428	0,047248	-0,24275	-0,21787	0,074086	0,16311	0,080525	1,369	0,33224	-0,034748	-0,10299	-0,015088	0,342
0919	0,068222	-0,010252	0,106	-0,086622	0,050336	0,20811	0,0017752	0,92523	0,0059902	-0,030998	0,075763	0,14991	0,9983
37	-0,060362	-0,04083	0,85139	0,32038	0,063304	0,26999	-0,071854	0,3515	-2,9112	0,055205	0,16977	-0,23157	-1,241
133	0,035685	0,0051874	-0,47179	-0,66024	0,033466	-0,10943	-0,059956	-0,84925	-2,0839	-0,11581	-0,26837	0,2302	0,0774
117	0,13931	-0,0014374	0,32429	-0,086011	-0,20347	0,19568	0,019956	-0,070748	2,9351	-0,13794	0,32712	-0,023951	-1,246
887	0,55911	0,05583	2,5061	3,1184	0,095446	0,18876	-0,013146	0,30225	-2,8925	-0,023955	-0,12352	-0,079684	-3,119
3	-0,033972	-0,019866	-0,16426	0,13267	0,0219	0,13477	-0,046638	0,34813	-0,15295	0,039866	0,25455	-0,28889	-0,675
88	0,063972	0,046116	0,64926	3,6436	-0,0119	-0,12852	0,074138	0,18437	-0,3258	0,13388	-0,088303	-0,044856	0,1192
76	-0,35304	-0,036723	-0,11135	0,85628	-0,18612	0,095454	-0,052328	-1,3329	-0,82659	0,15422	0,016911	-0,056279	1,5996
5195	0,11228	-0,006116	-0,82676	-0,36358	0,0369	0,26227	0,18086	1,9631	4,5971	-0,058884	0,0095528	0,073606	0,7607
88	0,017722	0,059866	0,40176	3,3811	0,02185	0,03898	0,0091384	0,48312	0,2417	-0,11362	0,016697	0,10264	-0,835
305	0,17978	0,021384	-0,55426	-0,034829	-0,03935	-0,07023	0,028362	0,12938	1,5021	-0,12263	0,25455	0,0011064	0,3294

Tabla 5. Coeficientes de funciones objetivo correspondiente a cada tramo.

5 OPTIMIZACIÓN POR MEDIO DE ALGORITMO GENÉTICO

La programación efectuada para llevar a cabo la optimización incorpora las restricciones que presenta el modelo, con la finalidad de obtener resultados y vectores solución que permitan la ejecución de cordones de soldadura de buen aspecto. Si las restricciones no fueran incorporadas, el algoritmo genético arrojaría resultados erróneos, del simple hecho de no acotar el proceso de optimización a las variables codificadas presentes en la Tabla 2.

En la programación de las funciones de inicialización, mutación y cruzamiento se debe implementar un código específico, el cual, permite asociar la programación efectuada al Toolbox de optimización de MATLAB, específicamente al complemento de algoritmo genético ([Mathworks Global Optimization Toolbox User's Guide, 2012](#)).

La optimización se realiza por medio de un clúster que consta de cinco computadoras interconectadas. Todas las variables del algoritmo genético se mantienen por defecto, excepto Population Size e Initial Population, las cuales poseen los siguientes valores mínimos, máximos y de variación:

Características	Population Size	Initial Population
Valor mínimo	50	50
Valor máximo	1000	1000
Valor de variación	50	50

Tabla 6. Resumen de valores que permiten la modificación de las diversas corridas del algoritmo genético.

Los valores descritos en la Tabla 6, permiten modificar en la programación efectuada ambas características del algoritmo a la vez, en donde se deben especificar éstos valores. La variación permite incrementar el valor de la característica, hasta alcanzar el máximo valor estipulado, buscando con esto la seguridad del resultado en la cantidad de individuos que se emplean en cada característica modificada, reduciendo así la posibilidad de alcanzar un falso óptimo.

Los resultados de la optimización corresponden al promedio de los resultados obtenidos de cada corrida, según el tramo y la característica optimizada, donde estos son aproximados a la centésima. De la misma manera se entregan los valores óptimos de cada parámetro controlado en el proceso de soldadura, siendo éstos aproximados a una cifra significativa.

En la Tabla 7 se presentan los resultados de la optimización con los parámetros controlados de forma codificada, los cuales se pueden transformar a los valores que se utilizan en el proceso de acuerdo a la Tabla 2.

Tramo 1						
	Voltaje	Velocidad de soldadura	Longitud de penduleo	velocidad del hilo	Caudal de gas	Resultado
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y= f (X _n)
Altura	2	1	-1	-2	0	3,50 [mm]
Ancho	0	-2	0	0	0	13,80 [mm]
Área	1	-2	-1	0	1	44,78 [mm ²]
Dilución	-1	-1	1	-1	0	40,29 [%]
Penetración	-1	-1	1	-2	1	1,50 [mm]

Tramo 2						
	Voltaje	Velocidad de soldadura	Longitud de penduleo	velocidad del hilo	Caudal de gas	Resultado
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y= f (X _n)
Altura	0	-1	0	0	1	3,90 [mm]
Ancho	-1	0	-1	-1	0	13,40 [mm]
Área	0	1	1	-1	0	41,10 [mm ²]
Dilución	-1	0	0	1	1	44,16 [%]
Penetración	-1	-2	-2	-1	2	2,00 [mm]

Tramo 3						
	Voltaje	Velocidad de soldadura	Longitud de penduleo	velocidad del hilo	Caudal de gas	Resultado
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	Y= f (X _n)
Altura	1	1	0	0	1	3,70 [mm]
Ancho	-2	0	1	0	1	13,60 [mm]
Área	0	0	-1	-1	-1	38,60 [mm ²]
Dilución	-1	0	-1	-1	1	44,97 [%]
Penetración	1	2	-1	-1	-2	2,70 [mm]

Tabla 7. Resultados obtenidos del proceso de optimización.

6 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Cada característica optimizada se ensayó tres veces, con el objetivo de obtener un promedio de ésta para sus diferentes tramos y poder determinar el porcentaje de error que arroja el modelo de segundo orden rotacional empleado.

Para determinar el porcentaje de error se utiliza la siguiente expresión (Sudhakaran R, 2011):

$$Error = \left(\frac{Promedio - Valor optimizado}{Promedio} \right) * 100 \quad (5)$$

Los resultados obtenidos de cada ensayo se pueden apreciar en la Tabla 8, la cual entrega el promedio de las mediciones de cada característica, el resultado optimizado de éstas y el porcentaje de error.

	Tramo N° 1				
	Altura	Ancho	Penetración	Área	Dilución
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[%]
Ensayo N° 1	3,43	13,43	1,45	42,86	39,40
Ensayo N° 2	3,85	13,56	1,31	41,03	45,08
Ensayo N° 3	3,36	13,68	1,54	43,14	31,70
Promedio	3,54	13,56	1,43	42,34	38,73
Resultado optimo	3,50	13,80	1,50	44,78	40,29
Error [%]	1,26	-1,79	-4,87	-5,75	-4,04

	Tramo N° 2				
	Altura	Ancho	Penetración	Área	Dilución
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[%]
Ensayo N° 1	3,78	13,48	1,56	41,98	40,86
Ensayo N° 2	3,72	13,18	1,99	40,97	45,60
Ensayo N° 3	3,67	13,32	2,60	41,73	40,47
Promedio	3,72	13,33	2,05	41,56	42,31
Resultado optimo	3,90	13,40	2,00	41,10	44,16
Error [%]	-4,74	-0,54	2,31	1,11	-4,37

	Tramo N° 3				
	Altura	Ancho	Penetración	Área	Dilución
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[%]
Ensayo N° 1	3,59	13,74	2,53	42,46	39,61
Ensayo N° 2	3,84	13,22	2,61	42,54	47,50
Ensayo N° 3	3,55	13,35	2,52	44,20	41,66
Promedio	3,66	13,43	2,55	43,07	42,92
Resultado optimo	3,70	13,60	2,70	38,60	44,97
Error [%]	-1,09	-1,23	-5,79	10,37	-4,77

Tabla 8. Resumen de resultados obtenidos en los ensayos de prueba y el porcentaje de error que presenta el modelo de segundo orden rotacional de acuerdo a cada tramo.

Todos los errores calculados no superan el 6 %, excepto el error en el área del tercer tramo el que llega a un 10,37 %, el cual, al ser positivo nos revela que el promedio de las mediciones se encuentra por encima del valor optimo arrojado por la función objetivo correspondiente, siendo esto satisfactorio en un proceso de recuperación, ya que el cordón de soldadura abarcara un mayor espacio en el metal base.

El bajo porcentaje de error demuestra que las funciones obtenidas representan de buena forma las propiedades de los cordones de soldadura, lo cual, es vital para poder lograr un buen

proceso de optimización. Además, el bajo porcentaje de error conseguido en el proceso indica que las modificaciones que se le realizaron a las características Initial Population y Population Size del algoritmo genético, logran alcanzar el objetivo de encontrar el óptimo global de la función. Esto se logra gracias a que se busca la seguridad del resultado en la cantidad de individuos que se emplean en cada característica modificada, reduciendo así la posibilidad de alcanzar un falso óptimo ([Mathworks Global Optimization Toolbox User's Guide, 2012](#)).

7 EFECTO DE LAS DIVERSAS VARIABLES PRESENTES EL PROCESO DE SOLDADURA

7.1 Efecto del voltaje en las propiedades del cordón de soldadura

El aumento de voltaje produce el incremento de la altura en los distintos tramos que conforman a la probeta, esto se vuelve notorio entre los diferentes tramos debido al efecto que produce la pendiente de la curva, ya que por medio de la gravedad el material de aporte en estado líquido tiende a derramarse, lo cual produce que éste se concentre en el centro del cordón de soldadura aumentando la altura y produciendo su propio ajuste a medida que se solidifica en el metal base.

Según la función, el ancho de los cordones se incrementa al aumentar el voltaje en el tramo número 1 debido a que la pendiente de la curva no es tan pronunciada, llevando a que no se produzca el derrame del material de aporte. En cambio en el tramo número 2, la curva describe un aumento del ancho hasta cierto punto en el cual empieza a decrecer, produciéndose esto por el aumento del voltaje que vuelve al material de aporte más líquido, provocando el derrame de dicho material que induce la disminución del ancho del cordón favoreciendo la altura de éste, ya que, el material se concentra en el centro del cordón. Por último en el tramo número 3 la curva tiende a decrecer, lo que se debe al mismo fenómeno descrito anteriormente.

La penetración en los dos primeros tramos es creciente, ya que el voltaje se encuentra sobre los 70 volts, produciendo una mayor liberación de energía en el corte circuito efectuado en el proceso de soldadura favoreciendo la penetración. En cambio en el tramo número 3 la curva disminuye al aumentar el voltaje, pero alcanza su máximo de penetración en el límite inferior del voltaje, esto se debe a que el bajo valor del parámetro lleva a que no se produzca derrame de material de aporte; lo cual concentra toda la temperatura del proceso en un solo punto permitiendo incrementar la penetración por la mezcla del metal base y el de aporte.

El área en los primeros dos tramos se comporta de forma similar al incrementarse el voltaje alcanzando un máximo que posteriormente decae. Lo anterior se debe a que en cada tramo existe un límite de voltaje en donde se alcanza la máxima área, pero al superarlo se produce el derrame del material de aporte por efecto de la pendiente reduciendo el área del cordón, aumentando principalmente la altura. Por otro lado, en el tercer tramo se incrementa la curva aumentando el área relacionada con la altura del cordón, ya que al utilizar un bajo voltaje no se provoca una buena penetración, lo anterior se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3 – Fotografía de ensayo N° 2 correspondiente al área de la probeta, donde se aprecia la baja penetración en el tramo N° 3 en el cordón de soldadura.

Las curvas de la dilución de los cordones de soldadura se comportan de forma semejante en los dos primeros tramos incrementándose hasta cierto punto donde el voltaje produce el equilibrio entre el área que abarca la penetración y la altura, para que posteriormente decrezca debido al derrame que produce el exceso de voltaje en las probetas. En el tramo número 3 la curva es decreciente debido a que en este tramo se aplica poco voltaje lo cual conlleva a una baja penetración, que produce que el área asociada a ésta sea muy inferior en comparación a la de la altura teniendo como resultado una baja dilución.

En la Figura 4 se presentan los gráficos correspondientes de cada tramo.

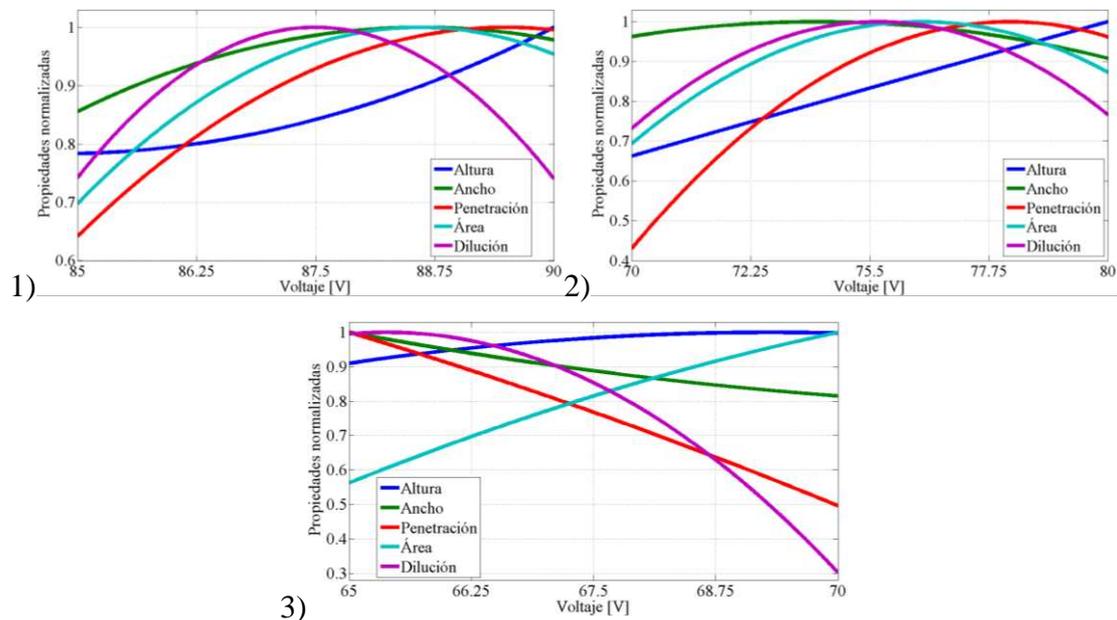


Figura 4 – Gráficos que muestran el efecto del voltaje en las distintas propiedades controladas en el proceso de optimización, de acuerdo a cada tramo.

7.2 Efecto de la velocidad de soldadura en las propiedades del cordón de soldadura

La variación de la velocidad de soldadura influye en la altura en los tramos 1 y 2, produciendo que la curva sea de carácter decreciente alcanzando el óptimo en el límite inferior del parámetro en ambos casos, lo cual se debe al aumento de la velocidad de soldadura provocando que el robot se desplace más rápido en la trayectoria programada, produciendo una menor depósito del material en el cordón. Por otro lado, en el tramo 3 el comportamiento de la altura es prácticamente constante, por el efecto que produce la gravedad sobre el material, ya que la pendiente es mucho mayor que en los dos primeros tramos, provocando que éste se acomode por sí solo en el metal base.

El ancho y el área de los cordones se comportan de igual forma que la altura al variar la velocidad de soldadura, siendo afectado por los mismos fenómenos en los correspondientes tramos.

La penetración se va perdiendo al incrementar el parámetro en el primer tramo, ya que el desplazamiento del robot al ser mayor no permite concentrar una mayor cantidad de energía en los distintos puntos de la probeta por medio del corte circuito, desfavoreciendo a la penetración. Con respecto al comportamiento de la propiedad en el tramo 2, éste tiende a crecer levemente en un comienzo de la curva para luego disminuir, siendo afectado de la misma forma que en el tramo 1. En cambio, en el último tramo la penetración aumenta con el incremento del parámetro. Esto es facilitado por la acción de la pendiente de la probeta, ya que permite aprovechar al máximo la energía calórica que se genera del proceso de soldadura y del material de aporte que se deposita encima de éste solidificándose. Así se mantiene una alta temperatura por un tiempo mayor en cada sección del cordón, facilitando la mezcla del metal base y el de aporte, consiguiendo con esto, un aumento de la penetración.

La curva que describe la dilución se comporta de forma similar que las de penetración en el primer y tercer tramo, sufriendo los mismos fenómenos. En cambio, el tramo 2 de la curva se comporta de forma parabólica, incrementándose la dilución hasta llegar al punto central de ésta, disminuyendo con el aumento de la velocidad de soldadura. En el tramo 3 se produce la misma situación, pero con la diferencia que la velocidad óptima no alcanza el límite superior del parámetro.

Una excesiva velocidad de soldadura provoca una deficiencia en el depósito del material de aporte en el metal base, produciendo que los cordones de soldadura sean deficientes como los que se presentan en la Figura 5.



Figura 5 – Efecto que produce una velocidad de soldadura muy alta en la realización de los cordones, donde se aprecia la falta de depositación de material de aporte.

Los gráficos que describen el comportamiento de las propiedades del cordón de soldadura al ir variando la velocidad de soldadura se presentan en la Figura 6.

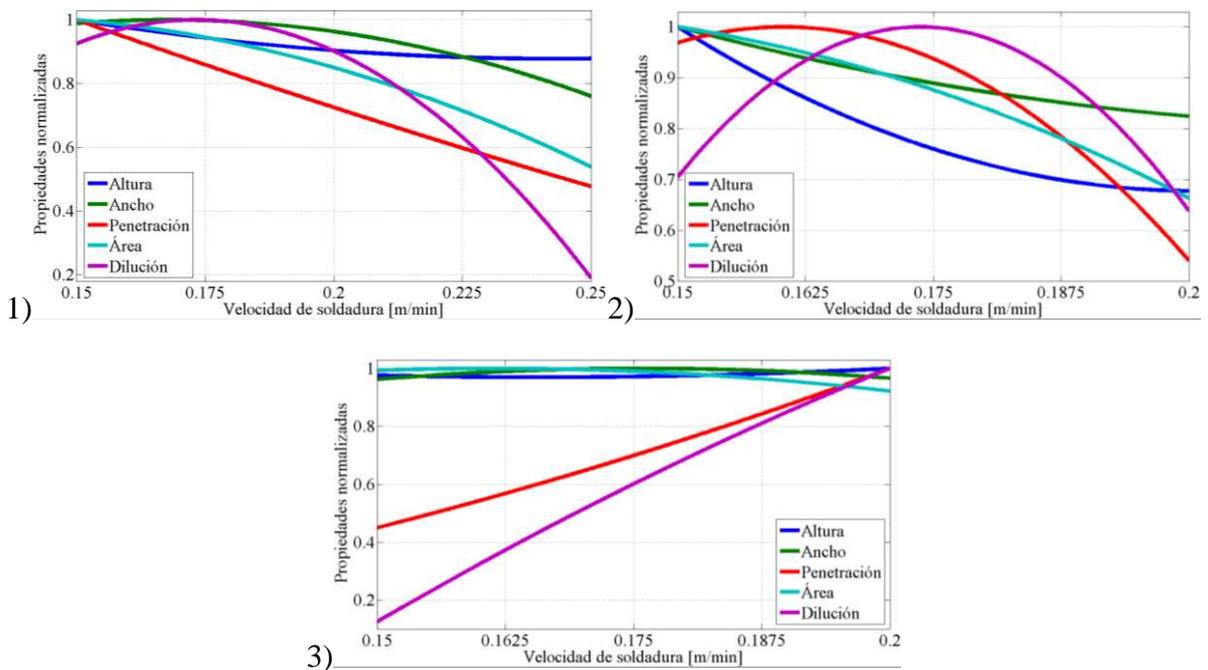


Figura 6 – Gráficos que muestran el efecto de la velocidad de soldadura en las distintas propiedades controladas en el proceso de optimización, de acuerdo a cada tramo.

7.3 Efecto de la longitud de penduleo en las propiedades del cordón de soldadura

El comportamiento de la altura es similar en todos los tramos, sin embargo se genera una leve disminución de la propiedad con el aumento del parámetro controlado. Esto se debe a que al incrementar la longitud de penduleo se empuja al material de aporte en estado líquido por medio de la acción del electrodo en una mayor distancia. Lo último permite que el material de aporte se acomode de forma más homogénea en la curva que describe el metal base, gracias al escurrimiento por efecto de la gravedad.

El ancho se comporta de manera creciente en el primer y tercer tramo, ya que al aumentar la longitud del penduleo el material depositado se acomoda mejor manera, mediante el empuje que produce el electrodo al material en estado líquido siendo esto muy beneficioso para el tramo 3, en donde se presenta el mayor escurrimiento por efecto de la pendiente. El segundo tramo posee una tendencia a decrecer, encontrándose el óptimo del parámetro en el límite inferior, produciéndose de igual manera la acomodación del material de aporte por medio del electrodo y la ayuda del escurrimiento.

La curva de penetración en el primer tramo se comporta de forma creciente con el aumento del parámetro. Esto es debido a que al tener un mayor desplazamiento alrededor de los puntos que conforman la curva, estos se ven más afectados por la temperatura liberada del proceso, lo cual, permite una mayor combinación de material de aporte y base, logrando así una buena penetración. El tramo 2 se comporta parabólicamente alcanzando el óptimo, con una longitud de 2.5 [mm] en donde éste es afectado por el escurrimiento del material fundido en la curva, el que al derramarse sobre material que se está solidificando aumenta la temperatura de la sección elevando la penetración; si la longitud supera el óptimo ocurriría un exceso de derrame dando un mal aspecto a los cordones de soldadura. Por último, el tercer tramo describe una curva decreciente donde ocurre el mismo fenómeno que el tramo 2, por lo que el valor óptimo es aún menor debido a la mayor pendiente que presenta la curva en el tramo. El escurrimiento del material de aporte se puede apreciar en la Figura 7.

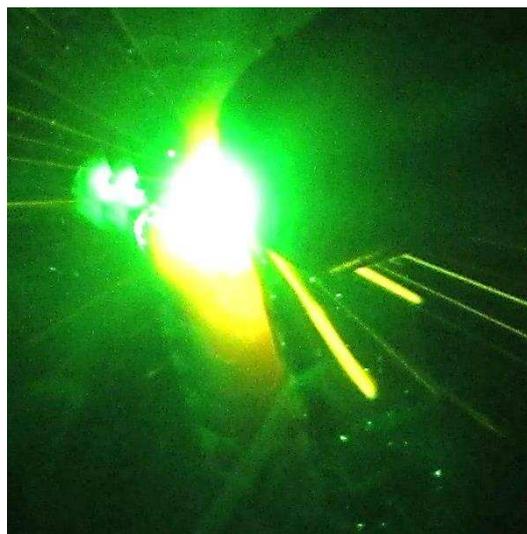


Figura 7 – Fotografía correspondiente al ensayo N°1 de penetración, donde se aprecia el escurrimiento del metal de aporte en el tercer tramo de la probeta.

El área en el tramo 1 posee un comportamiento creciente, porque el aumento del parámetro produce que una serie de puntos que conforman la curva se vean perturbados por el proceso de soldadura mediante el corte circuito, incrementando la temperatura la cual favorece al área que comprende la penetración. En cambio la curva correspondiente al tramo 2 decae gradualmente mientras que la del tramo 3 se incrementa de la misma forma, siendo ambos tramos afectados por el mismo fenómeno que ocurre en el segundo tramo de la penetración por el efecto del escurrimiento.

La curva de dilución se incrementa en los dos primeros tramos con el aumento del parámetro, ocurriendo gracias a la temperatura generada por el corte circuito en los diversos puntos que se ven afectados por la longitud de penduleo; además la dilución se beneficia por el empuje que produce el electrodo al metal en estado líquido permitiendo una mejor combinación del metal base con el de aporte. La curva que describe al tercer tramo se comporta de forma decreciente, alcanzando el óptimo en el límite inferior del parámetro, favoreciendo éste al derrame del material de aporte que incrementa la temperatura sobre material que se está solidificando, además del empuje que genera el electrodo en el metal líquido por su corta longitud de penduleo logrando una buena combinación del metal base con el de aporte en la pendiente del tercer tramo.

Los gráficos que describen el comportamiento de las propiedades del cordón de soldadura al ir variando la longitud de penduleo se presentan en la Figura 8.

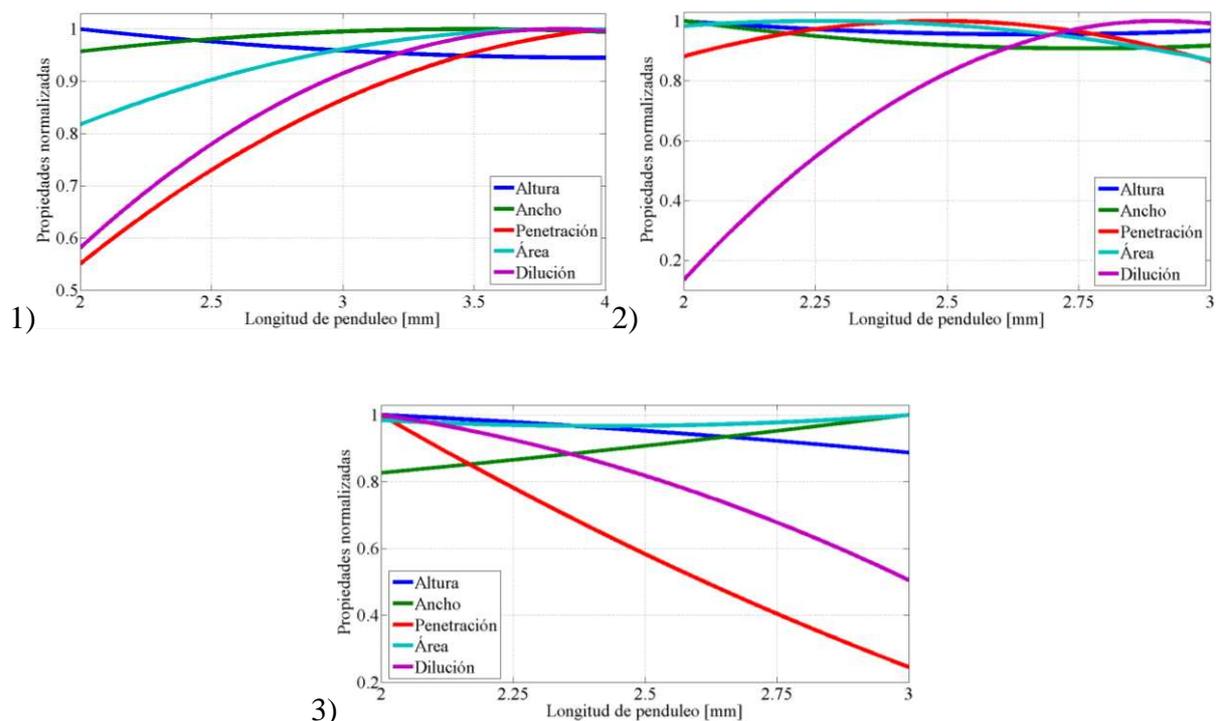


Figura 8 – Gráficos que muestran el efecto de la longitud de penduleo en las distintas propiedades controladas en el proceso de optimización, de acuerdo a cada tramo.

7.4 Efecto de la velocidad del hilo en las propiedades del cordón de soldadura

El comportamiento de la curva que describe la altura de los dos primeros tramos, es decreciente con el aumento de la velocidad de salida del hilo. En cambio en el tramo 3 se incrementa levemente para luego decrecer, debido que al aumentar el parámetro se producen más cortes circuitos en un determinado tiempo. Esto último genera un gran aumento de la temperatura en el proceso de soldadura lo que produce que el material de aporte se vuelva tan líquido derramándose en exceso, aumentando el ancho y no la altura del cordón, esto fenómeno se puede apreciar en la Figura 9. En el tercer tramo se produce el derrame del material hacia el centro del cordón acomodándose por sí solo debido a que la pendiente es mucho mayor, lo cual permite incrementar la propiedad a diferencia de los dos primeros tramos.

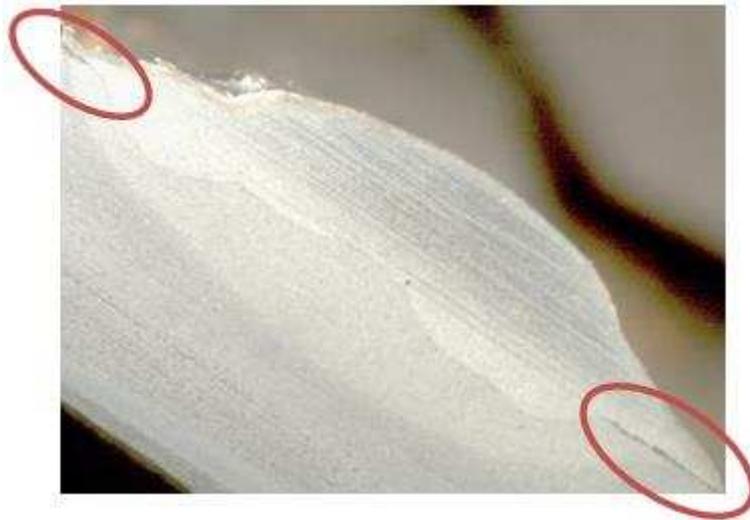


Figura 9 – Fotografía correspondiente al primer tramo del ensayo N° 8 de la matriz de diseño, donde se aprecia el exceso del derrame del material y en los óvalos rojos la falta de adherencia del metal de aporte en los bodes del cordón de soldadura.

El ancho es representado en el primer tramo por una curva creciente que se ilustra en la Figura 11, la que llega a un punto en el cual decrece lentamente, donde el aumento de la velocidad del hilo provoca que el ancho crezca. Este crecimiento del ancho es gracias a la mayor cantidad de cortocircuitos que se producen, haciendo que el material de aporte se vuelva más líquido y oscuro. Además se presenta un aumento de material de aporte que se está agregando al cordón. En el segundo y tercer tramo las curvas decrecen con el aumento de la velocidad del hilo, ya que solo se genera el aumento de la altura de los cordones por el exceso de cortes circuitos provocado por el derrame del material de aporte que se concentra en el centro del cordón. Por otra parte el aumento del parámetro provoca que la apariencia de los cordones sea deficiente presentando socavaciones en los bordes por el exceso de energía producida por la mayor cantidad de cortes circuitos en un tiempo determinado.

Las curvas de penetración para los tres tramos decrecen con una mayor velocidad del hilo excepto la del tramo 1 la cual llega a un punto que comienza a aumentar. Los óptimos en cada caso se encuentran en el límite inferior de cada tramo, esto se debe a que a una menor

velocidad no ocurren tan consecutivamente los cortocircuitos, permitiendo al electrodo penetrar en el metal base en estado líquido alcanzando una mayor penetración.

El área en los dos primeros tramos se comporta de forma creciente, debido a que al aumentar el parámetro se deposita una mayor cantidad de material de aporte que se concentra en el área que comprende a la altura del cordón. Por el contrario, en el tercer tramo la curva es decreciente alcanzando el óptimo en el límite inferior provocándose el mismo fenómeno que en la penetración acompañada del escurrimiento del metal base por el efecto de la pendiente.

La curva de dilución se comporta de forma decreciente en el primer tramo, mientras que en el segundo ésta decrece hasta un cierto punto para mantenerse casi constante, alcanzando ambas el óptimo en el límite inferior de cada tramo que corresponde a una velocidad de 4 [m/min], debido a que a una menor velocidad permitirá obtener una mayor área que se relaciona con la penetración incrementando la dilución. En cambio, el tercer tramo se comporta como una parábola logrando el valor óptimo en el límite superior, esto produce una mayor cantidad de cortocircuitos que aumentan la temperatura, produciendo el derrame del material de aporte y base permitiendo la buena combinación de ambos. Así se observa que no ocurren derrames excesivos pero se presentan unas pequeñas socavaciones en el borde de los cordones de soldadura, como se muestra en la Figura 10.

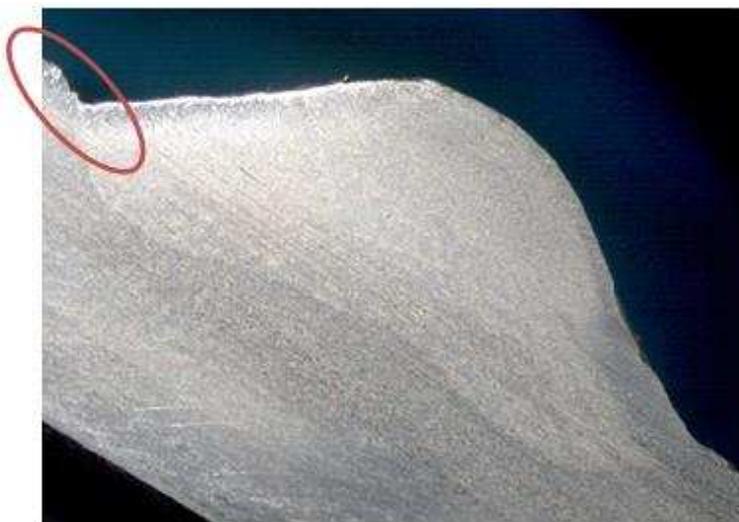


Figura 10 – Fotografía correspondiente al tramo N°3 del tercer ensayo de dilución, en donde se aprecia la socavación en el ovalo de color rojo.

Los gráficos que describen el comportamiento de las propiedades del cordón de soldadura al ir variando la velocidad del hilo se presentan en la Figura 11.

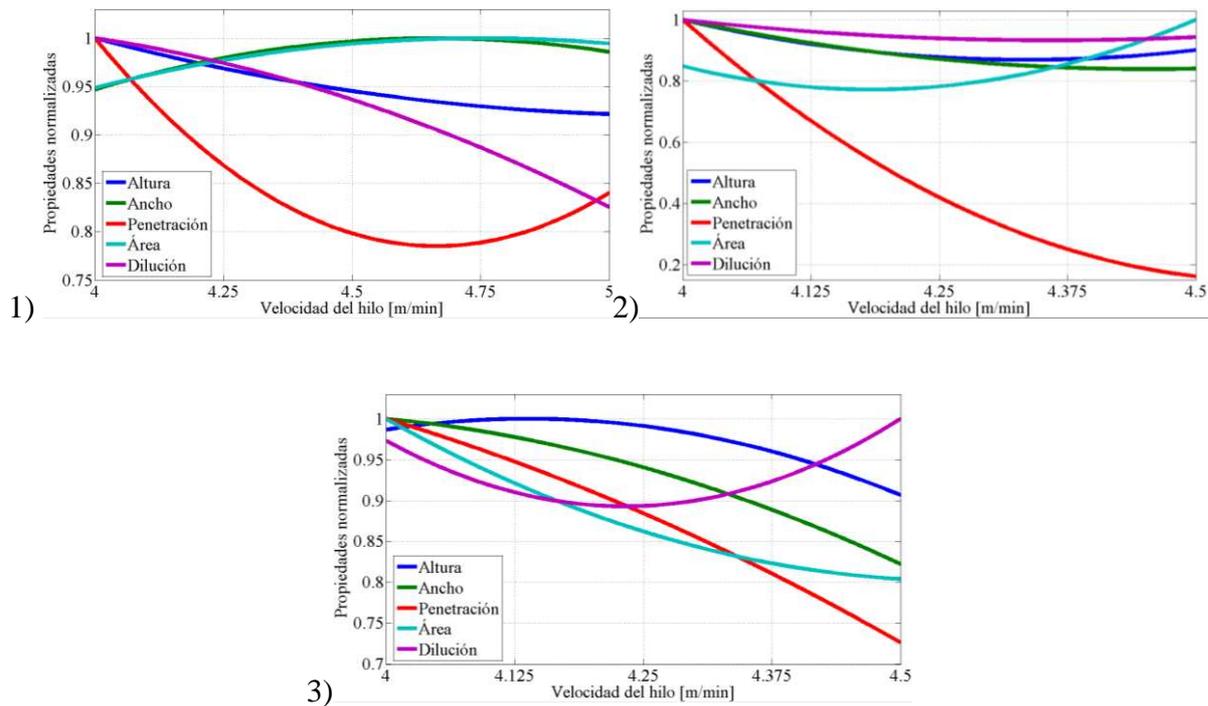


Figura 11 – Gráficos que muestran el efecto de la velocidad del hilo en las distintas propiedades controladas en el proceso de optimización, de acuerdo a cada tramo.

7.5 Efecto del caudal de gas en las propiedades del cordón de soldadura

La curva que describe el comportamiento de la altura en el primer tramo en la Figura 13 es de carácter decreciente mientras que los tramos dos y tres se comportan de forma creciente, esto se debe a la presión que ejerce el gas en el cordón de soldadura ya que al aumentarla ésta produce que el material de aporte se disperse hacia los bordes del cordón como es en el caso del tramo 1 que no se ve afectado por una gran pendiente. En cambio en los otros tramos el aumento del caudal del gas provoca una mayor presión sobre el material en estado líquido derramándose con mayor facilidad por el efecto de la gravedad en la pendiente que comprenden a estos tramos, acomodándose en el centro del cordón de soldadura consiguiendo una mayor altura.

El ancho en el primer tramo se comporta de forma creciente con el aumento del caudal de gas, ya que ejerce una mayor presión en el material en estado líquido facilitando a que éste se disperse a los bordes del cordón. En el segundo tramo, el ancho disminuye con el aumento del caudal de gas, ocurriendo lo contrario para el tercer tramo, donde en ambos tramos se aprecia como el material se acomoda con mayor facilidad en los bordes debido a la presión que ejerce el gas y el escurrimiento que provoca la pendiente en el material de aporte. Las curvas se pueden apreciar en la Figura 13.

La curva que representa el área de los cordones, se incrementa en el primer tramo por la presión que ejerce el gas protector en el cordón de soldadura favoreciendo el ancho que permite aumentar el área del cordón, mientras que en el tramo 2 y 3 la curva que describe al parámetro se comporta de forma decreciente en un comienzo para llegar a un punto donde éstas se incrementan, alcanzando el óptimo en el límite inferior y superior respectivamente.

En ambos casos la presión que ejerce el caudal de gas junto al derrame producido por las pendientes permite acomodar el material de aporte sacando el máximo provecho al área que se relaciona con la altura del cordón.

La penetración y la dilución son propiedades que no se ven afectadas visualmente por el caudal de gas como se muestra en la Figura 12, pero cada una de estas propiedades posee un óptimo para cada tramo el cual es descrito por la curva correspondiente en los gráficos de la Figura 13. La penetración en el primer y tercer tramo decrece, mientras que el segundo tramo se comporta de forma creciente. En cambio la dilución se manifiesta de manera decreciente en el primer tramo y creciente en los dos restantes.



Figura 12 – Fotografías correspondientes al primer tramo del ensayo N° 25 y N° 26 de la matriz de diseño, los cuales se realizaron con un caudal de gas protector equivalente a 16 y 20 [Lts/min] respectivamente, donde se observa que no existen grandes variaciones en la penetración del cordón de soldadura.

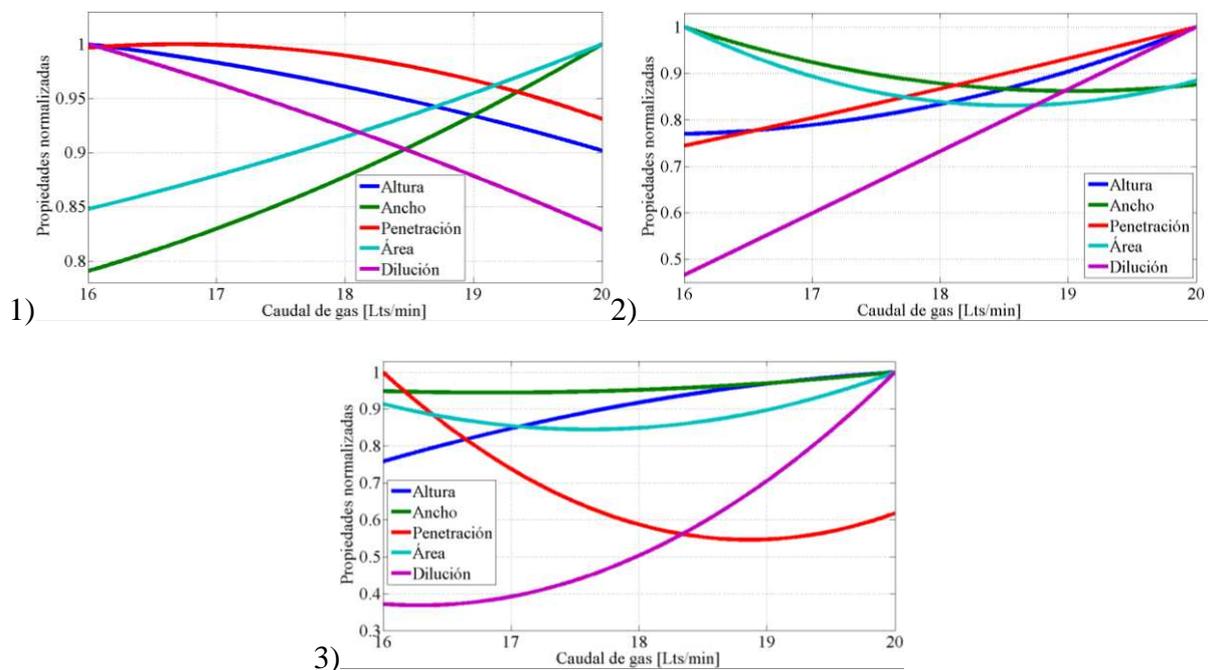


Figura 13 – Gráficos que muestran el efecto del caudal de gas en las distintas propiedades controladas en el proceso de optimización, de acuerdo a cada tramo.

8 CONCLUSIONES

El modelo de segundo orden rotacional propuesto por Cochran y Cox, es una buena herramienta para obtener las ecuaciones que describen el comportamiento de las propiedades de los cordones de soldadura. Esto se ratifica con la optimización de las diversas funciones, porque al comparar las pruebas de soldadura realizadas con los parámetros optimizados y los valores arrojados por el algoritmo genético de cada función que describe las diferentes propiedades, se encuentran errores que no superan el 6 %.

El aumento de voltaje en el proceso tiende a aplanar el cordón de soldadura en las zonas de baja pendiente incrementando el ancho, siendo lo contrario para las zonas con una pendiente más inclinada en donde por medio del escurrimiento se incrementa la altura de los cordones. Un voltaje excesivamente alto puede causar porosidad, salpicaduras y socavado dependiendo de la inclinación presente en el proceso.

En la medida en que se aumenta la velocidad de soldadura, la cantidad de energía térmica por longitud de soldadura transferida desde el arco hacia el metal base disminuye, porque el arco actúa directamente sobre el metal base, además, existe una tendencia a producir socavado a lo largo de los bordes del cordón de soldadura debido a que hay insuficiente deposición de metal de aporte para llenar el trayecto fundido por el arco.

El aumento de la longitud de penduleo permite reducir el escurrimiento excesivo del material de aporte en estado líquido en las zonas que presentan una inclinación importante, por medio del empuje que provoca el electrodo al metal fundido se produce la acomodación del material en el metal base favoreciendo en estas condiciones la geometría del cordón de soldadura. Además, el parámetro permite mejorar la penetración y el porcentaje de dilución de los cordones, ya que el desplazamiento crea una mejor combinación del metal base con el de aporte, donde el valor óptimo de la longitud de penduleo dependerá de la inclinación.

El aumento excesivo de la velocidad del hilo produce un exceso de material de aporte el cual no se adhiere del todo al metal base en los bordes del cordón y un incremento en la temperatura por la mayor cantidad de cortocircuitos producidos en un mismo lapso de tiempo. Además, al conseguir una buena regulación del parámetro se logra mejorar la penetración de aquellas zonas que se presentan inclinaciones, ya que el electrodo no entra en contacto directo con toda la gota de metal fundido gracias al efecto de la gravedad.

El caudal de gas produce un efecto positivo en la geometría del cordón, porque la presión que ejerce éste permite colaborar con la distribución del material en estado líquido en el cordón de soldadura.

Toda aquella soldadura realizada en vertical o en una posición que presente inclinación se debe soldar desde la parte inferior hacia la superior, con la finalidad de reducir al máximo el escurrimiento del material de aporte en el proceso, debido a que el brazo robótico no posee la cualidad de un operario de retomar el cordón de soldadura para evitar este fenómeno.

Para lograr un buen proceso de soldadura influyen los diversos parámetros controlados, por esta razón se deben combinar todos, no privilegiando solamente algunos de estos, ya que si así fuese, se le estaría restando propiedades al cordón de soldadura haciendo que éste sea deficiente.

REFERENCIAS

- *CIMA – Centro Integrado de Manufactura y Automatización. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso Chile.
- Cochran, William G y Cox, Gertrude M. Diseños Experimentales. 2ª. Ed. México, Trillas, 1990. 661 p.
- Indura S.A. Industria y Comercio. Manual de sistemas y materiales de soldadura Indura.
- Mathworks, Global Optimization Toolbox *User's Guide*, 2012.
- Mathworks, StatisticsToolbox, Perform statistical modeling and analysis, 2012.
- Sudhakaran R, [Et al]. Effect of Welding Process Parameters on Weld Bead Geometry and Optimization of Process Parameters to Maximize Depth to Width Ratio for Stainless Steel Gas Tungsten Arc Welded Plates Using Genetic Algorithm por Sudhakaran. European Journal of Scientific Research, 62(1):76-94, 2011.
- Wegst C.W. Stahlschlüssel. Marbach Verlag Stahlschlüssel Wegst Gmbh 2004.
- Xin She Yang. Nature-inspired metaheuristic algorithms. 2ª.Ed. United Kingdom, Luniver Press, 2010. ISBN-13: 978-1-905986-28-6, ISBN-10: 1-905986-28-9.