









TIEMPO	Presión PIT001 (kPa)	Velocidad SIT001 (rpm)	Impactos IIT001 (#)	Tonelaje WIT001 (ton)	Nivel (%)
09/03/2013 13:50	7569.033203	-9.455222	54.277195	5865.285645	24.1
09/03/2013 14:02	7556.491699	-9.316151	34.064598	5607.642578	24.2
09/03/2013 14:14	7581.770996	-9.006186	15.292912	5174.375488	24.3
09/03/2013 14:26	7585.494629	-8.899946	14.223601	5003.990234	24.4
09/03/2013 14:38	7588.129883	-8.811069	15.397858	5113.858887	24.1
09/03/2013 14:50	7619.701172	-8.652559	12.769485	5541.140625	24.5
09/03/2013 15:02	7700.449219	-8.451414	7.855118	6039.827637	24.3
09/03/2013 15:14	7846.449219	-8.522639	6.14108	6017.09375	24.8
09/03/2013 15:26	7812.853516	-8.736026	7.209402	6037.611816	25
09/03/2013 15:38	7790.922852	-8.527492	6.12005	6053.630371	24.9
09/03/2013 15:50	7899.404297	-8.53059	4.27845	6074.058105	25
09/03/2013 16:02	8034.14209	-8.720356	3.992412	6064.570313	25.4
09/03/2013 16:14	8049.970215	-8.824654	4.780845	6123.652832	25.6
09/03/2013 16:26	7956.713867	-8.695879	4.719217	6178.674316	25.5
09/03/2013 16:38	7875.774414	-8.461117	5.177606	6118.685547	25.5
09/03/2013 16:50	7849.004395	-8.376428	7.061675	6051.259277	25.3
09/03/2013 17:02	7892.540527	-8.332958	4.768754	5934.397949	25.6
09/03/2013 17:14	7965.484375	-8.32284	3.462259	5836.29541	25.4
09/03/2013 17:26	8045.587891	-8.264791	2.183196	5824.623047	25.8
09/03/2013 17:38	8182.540527	-8.30986	2.109935	5825.54248	25.8
09/03/2013 17:50	8361.017578	-8.374463	1.46224	5824.498535	25.8
09/03/2013 18:02	8424.222656	-8.642644	1.609672	5822.526367	26
09/03/2013 18:14	8369.546875	-8.680588	1.889322	5776.830078	25.8
09/03/2013 18:26	8193.433594	-8.549606	3.01005	5762.736816	25.7
09/03/2013 18:38	8074.916992	-8.401016	2.859359	5792.712402	25.8
09/03/2013 18:50	8016.671387	-8.400786	3.375301	5802.058105	25.5
09/03/2013 19:02	7991.806152	-8.399215	2.909365	5823.691895	25.3
09/03/2013 19:14	8019.736328	-8.400674	3.272929	5793.42334	25
09/03/2013 19:26	8153.689453	-8.529442	2.534674	5801.226563	24.5
09/03/2013 19:38	8216.161133	-8.815104	2.446652	5781.486816	24.2
09/03/2013 19:50	8019.416992	-8.949664	5.948205	5793.614746	23.2
09/03/2013 20:02	7743.291992	-8.892467	9.652503	5837.618652	22.5
09/03/2013 20:14	7672.679688	-8.840141	10.081423	5904.313477	22.4
09/03/2013 20:26	7671.836914	-8.802446	7.717485	5911.459473	22.7
09/03/2013 20:38	7696.317871	-8.806808	8.295887	5926.601563	23
09/03/2013 20:50	7658.160645	-8.799951	8.956735	5938.859863	23
09/03/2013 21:02	7658.116211	-8.800115	9.113001	5927.832031	22.7
09/03/2013 21:14	7630.067871	-8.790077	12.018485	5867.714844	22.6
09/03/2013 21:26	7615.794434	-8.760719	12.244823	5868.898438	22.7
09/03/2013 21:38	7633.547852	-8.791814	12.618527	5897.121582	22.8

TIEMPO	Presión PIT001 (kPa)	Velocidad SIT001 (rpm)	Impactos IIT001 (#)	Tonelaje WIT001 (ton)	Nivel (%)
09/03/2013 21:50	7595.616699	-8.783814	13.911526	5945.55127	22.3
09/03/2013 22:02	7592.047852	-8.760846	15.149951	5907.879883	22.5
09/03/2013 22:14	7594.894043	-8.751534	14.729353	5920.512207	22.6
09/03/2013 22:26	7588.547852	-8.750208	14.263721	5935.30127	22.6
09/03/2013 22:38	7576.775879	-8.750067	13.853426	5904.334961	22.4
09/03/2013 22:50	7566.34082	-8.746265	16.511112	5875.888672	22.4
09/03/2013 23:02	7572.430664	-8.73007	14.063329	5870.382813	22.4
09/03/2013 23:14	7579.125488	-8.729791	14.593384	5855.569824	22.3
09/03/2013 23:26	7589.946289	-8.729409	13.406364	5837.098145	22.4
09/03/2013 23:38	7588.113281	-8.720029	13.402878	5838.287598	22.4
09/03/2013 23:50	7590.95166	-8.719963	12.360824	5810.37207	22.6
10/03/2013 00:02	7587.135254	-8.709899	12.171854	5775.568359	22.2
10/03/2013 00:14	7587.349609	-8.710017	9.883497	5798.626953	22.4
10/03/2013 00:26	7605.816895	-8.756325	10.056904	5838.98291	22.3
10/03/2013 00:38	7604.359375	-8.7902	9.364439	5831.161133	22.2
10/03/2013 00:50	7617.944824	-8.839055	10.203532	5810.149902	22.3
10/03/2013 01:02	7600.135254	-8.870358	11.169336	5860.099609	22.4
10/03/2013 01:14	7597.365234	-8.869738	10.47416	5890.280273	22.3
10/03/2013 01:26	7588.70752	-8.855712	10.901071	5877.345703	22.3
10/03/2013 01:38	7581.37793	-8.819401	12.414293	5902.432129	22.4
10/03/2013 01:50	7576.582031	-8.802694	12.86411	5906.682617	22.3
10/03/2013 02:02	7566.378418	-8.782448	11.221585	5861.65918	22.2
10/03/2013 02:14	7562.915039	-8.769749	12.894107	5840.755371	22.2
10/03/2013 02:26	7577.297363	-8.77007	11.176403	5847.899414	22
10/03/2013 02:38	7572.716309	-8.769856	11.665689	5875.042969	22
10/03/2013 02:50	7559.431641	-8.765073	13.32479	5885.382324	21.4
10/03/2013 03:02	7552.787598	-8.74196	14.404255	5877.172852	21.9
10/03/2013 03:14	7553.299316	-8.740083	13.261837	5867.623047	21.9
10/03/2013 03:26	7563.176758	-8.74004	13.669466	5844.140137	22
10/03/2013 03:38	7548.265625	-8.739887	13.315757	5828.796387	22
10/03/2013 03:50	7539.449707	-8.7328	15.285975	5844.879395	21.8
10/03/2013 04:02	7561.943848	-8.72983	14.499899	5823.585449	21.8
10/03/2013 04:14	7584.373535	-8.729977	11.794373	5835.77002	21.9
10/03/2013 04:26	7585.594238	-8.740006	12.274433	5824.526367	21.9
10/03/2013 04:38	7581.423828	-8.739843	11.118975	5914.67334	21.9
10/03/2013 04:50	7552.050293	-8.740125	16.002222	5972.088379	21.7
10/03/2013 05:02	7532.065918	-8.740027	17.977608	5724.742676	21.3
10/03/2013 05:14	7534.595703	-8.740091	13.503976	5690.895996	21.7
10/03/2013 05:26	7521.162598	-8.740283	14.696147	5607.441895	21.8
10/03/2013 05:38	7497.470215	-8.740067	18.301355	5715.95459	21.7

TIEMPO	Presión PIT001 (kPa)	Velocidad SIT001 (rpm)	Impactos IIT001 (#)	Tonelaje WIT001 (ton)	Nivel (%)
10/03/2013 05:50	7494.124512	-8.740097	17.004948	5835.751465	21.8
10/03/2013 06:02	7524.800293	-8.740107	13.715889	5900.553223	21.6
10/03/2013 06:14	7521.034668	-8.739976	13.51942	5882.842773	21.9
10/03/2013 06:26	7494.17334	-8.73988	16.3927	5880.862305	21.7
10/03/2013 06:38	7500.747559	-8.739942	16.239578	5879.852539	21.8
10/03/2013 06:50	7507.722656	-8.740161	14.605647	5882.779785	21.9
10/03/2013 07:02	7523.904297	-8.721139	15.526761	5872.615723	21.8
10/03/2013 07:14	7564.888672	-8.608427	12.907166	5814.708984	21.9
10/03/2013 07:26	7611.137207	-8.600058	9.146983	5855.166016	22.2
10/03/2013 07:38	7683.933594	-8.608613	7.690603	5872.285156	22
10/03/2013 07:50	7730.732422	-8.620215	7.04103	5889.280273	22.3



## ANEXO 2

## ESTIMACIÓN DE NIVEL DE CARGA DEL MOLINO

El molino de bolas utilizado por el presente estudio pertenece a MINERA CHINALCO PERU. Asimismo, la data utilizada ha sido obtenida directamente del sistema de control distribuido de la planta. A continuación se detallan las principales características del equipo.

Especificación	Data
Velocidad de molino	9.31 RPM (76% de la velocidad crítica)
Nivel de carga máximo	30%
Nivel de carga mínimo	20%
Presión de operación máxima	9200kPa
Número máximo de impactos	200

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas - Molino

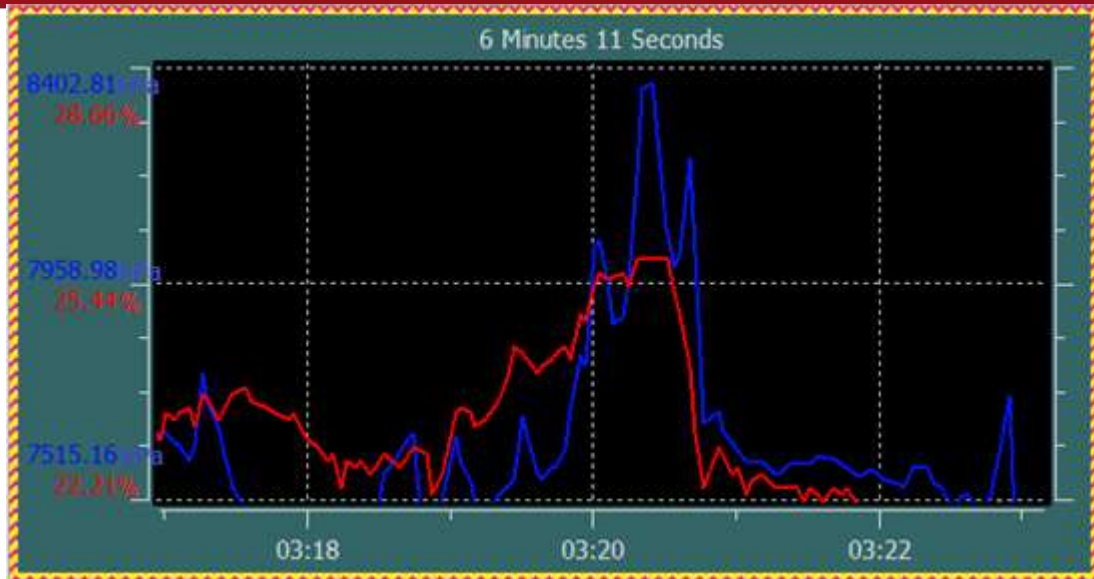
Fuente: Fuller Traylor Grinding Mill – FLS Smith

El estudio presenta los criterios de análisis utilizados por el operador de sala de control a fin de estimar y controlar el nivel de carga del molino. Los criterios se basan en la experiencia del operador y en el análisis de las tendencias históricas de las variables de presión, velocidad, impactos y tonelaje del molino.

#### I. PRIMER CRITERIO: Presión de operación del molino.

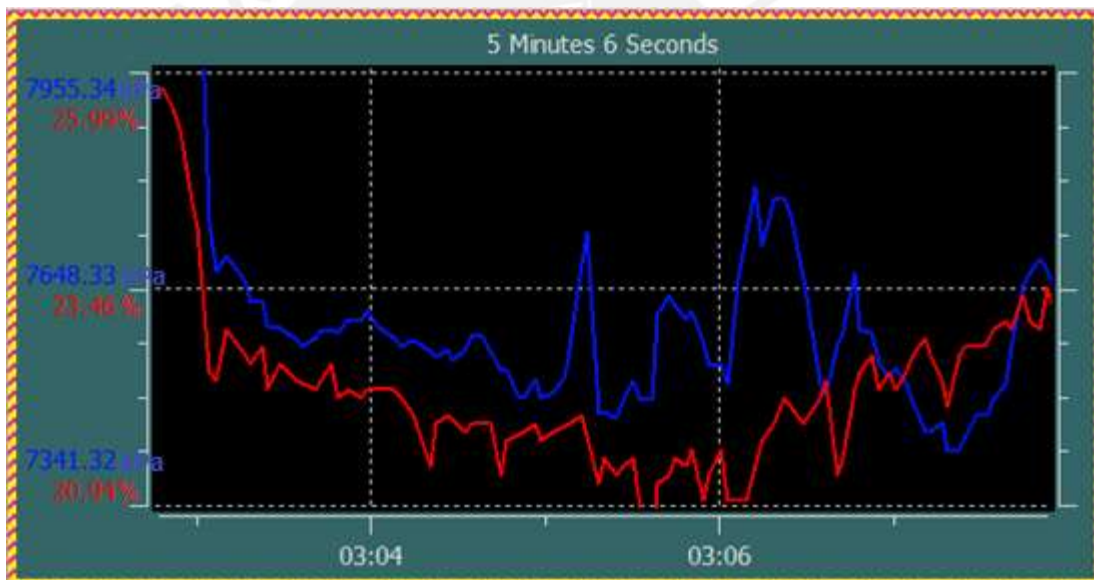
Es el parámetro operativo que nos brinda mayor información sobre el nivel de carga. La presión máxima de operación está relacionada al nivel máximo de carga permitido por el fabricante. Similarmente, niveles mínimos de presión indican que el molino está operando a baja carga. La inducción es bastante lógica, si el mineral permanece acumulado, incrementa el esfuerzo desarrollado durante las revoluciones, y por ende, la presión de desarrollada por el equipo. Según el fabricante la máxima presión de operación permitida es de 9200kPa, presión equivalente a un nivel de carga del 30%.





**Figura 1.** Presión de operación baja (kPa) ■ vs. Nivel de carga (%) ■

Fuente: Elaboración propia



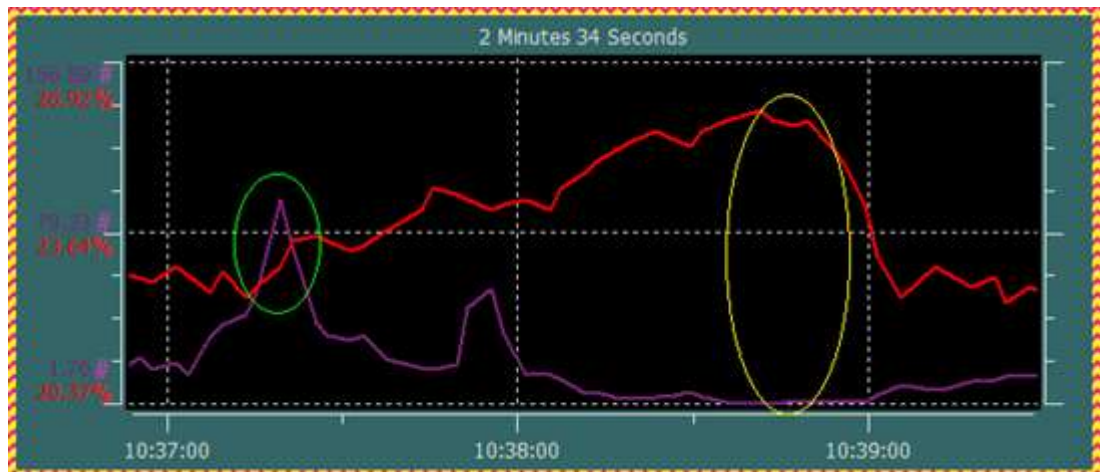
**Figura 2.** Presión de operación alta (kPa) ■ vs. Nivel de carga (%) ■

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 2 y 3 muestran la relación existente entre el nivel de carga y la presión desarrollada por el molino durante la operación. En la figura 1 podemos notar que el nivel de carga es bajo (22%) cuando el molino desarrolla presiones de operación mínimas (7500kPa). Similarmente, en la figura 2 notamos que a altas presiones de operación (8500kPa), el nivel de carga registra niveles máximos (29%). El operador de sala de control evalúa los niveles de presión y los relaciona con un nivel de carga en particular.

## I. SEGUNDO CRITERIO: Impactos durante la operación.

El nivel de impactos registrados nos indica indirectamente el nivel de carga. Mayor número de impactos indica carga baja en el molino (las bolas impactan mayormente el revestimiento del molino). Menor número de impactos indica alto nivel de carga presente en el molino (existe menor impacto debido a que las bolas colisionan en mayor medida sobre el "riñón" de mineral formado). El impactómetro se calibra con un nivel de carga en particular y para el caso de CHINALCO es un valor de 200 impactos para un nivel de carga del 30%.



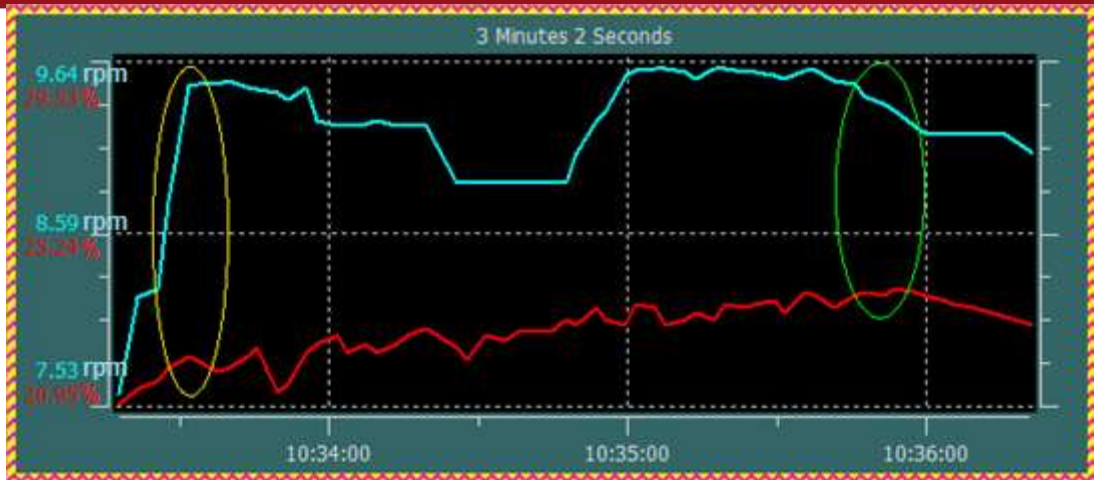
**Figura 3.** Impactos (#) ■ vs. Nivel de carga (%) ■

Fuente: Elaboración propia

La zona seleccionada en color verde indica que a menor nivel de carga los impactos registran valores pico. Por otro lado, la zona amarilla indica que a niveles máximos de carga, los impactos tienden a ser mínimos. El operador evalúa la cantidad de impactos por minuto y lo asocia a un nivel de carga en particular.

## II. TERCER CRITERIO: Velocidad de operación del molino.

Este parámetro nos permite controlar el nivel de carga en el molino. Si aumentamos la velocidad del molino, disminuimos la carga del molino. Si disminuimos la velocidad del molino, aumentamos la carga del molino. Cuando el molino registre nivel de carga máximo, se debe aumentar la velocidad del molino gradualmente hasta que las presiones desarrolladas por el molino empiecen a disminuir. Al disminuir las presiones de operación, por ende disminuirá el nivel de carga en el molino.



**Figura 4.** Velocidad del molino (rpm) ■ vs. Nivel de carga (%) ■

Fuente: Elaboración propia

La zona seleccionada en amarillo indica que el nivel de carga disminuye gradualmente a medida que se incrementa la velocidad del molino. Análogamente, la zona de color verde indica que el nivel de carga aumenta a medida que la velocidad de molino disminuye. En resumen, esta técnica permite evitar la saturación del molino. El operador aumenta o disminuye gradualmente la velocidad del para controlar la carga dentro del rango de operación establecido por el fabricante.

### III. CUARTO CRITERIO: Tonelaje durante la operación.

Este parámetro nos ayuda a controlar directamente el nivel de carga del molino. Es el último parámetro que se modifica en la operación debido a que afecta directamente la producción. Cuando el molino registre nivel de carga máximo, y se está operando el molino a la velocidad crítica nominal, debe reducirse el tonelaje de la operación, a fin de aliviar las presiones en el molino y por ende disminuir el nivel de carga del molino.

Finalmente, el operador utilizará uno o más criterios a fin de estimar y controlar el nivel de carga. Este conocimiento y experiencia es la información que se le brinda al control neuronal implementado.

## ANEXO 3

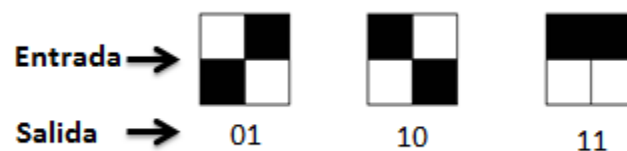
## ALGORITMO NEURONAL SUPERVISADO DE RETROPROPAGACIÓN

Es el método de entrenamiento de redes neuronales de mayor uso hoy en día. Tiene como principal característica la capacidad de autoadaptar los pesos sinápticos de la red, a fin aprender la relación existente entre un conjunto de patrones de entrada y sus salidas correspondientes. Adicionalmente, permite obtener salidas satisfactorias a partir de entradas que el sistema no ha procesado previamente en la fase de entrenamiento. A continuación se detalla el funcionamiento y pasos del algoritmo.

## II. Algoritmo de Retropropagación

Es un método de aprendizaje supervisado en el que se distinguen claramente dos etapas. La primera etapa consiste en aplicar un patrón de entrada que se propaga a través de las distintas capas de la red neuronal, hasta producir un valor en la neurona de salida. La salida obtenida se compara con el patrón de salida deseado y se calcula el error final. La segunda etapa consiste en propagar el error final desde la capa de salida hasta las capas internas de la red. Cada neurona recibe un error que es proporcional a su contribución sobre el error total de la red. En base al error recibido, se ajustan los pesos sinápticos de cada neurona.

La red neuronal aprende por ejemplos. Se ingresa patrones de entrenamiento relacionados al comportamiento deseado que se espera para la red. La red ajusta los pesos sinápticos de su estructura de tal manera que cuando el entrenamiento ha finalizado, se obtiene la salida deseada para todos los patrones ingresados. La Figura 1 muestra los patrones de entrenamiento para la red neuronal de la Figura 2.

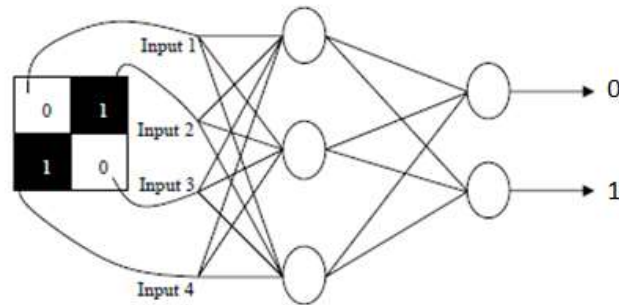


**Figura 1.** Patrones de entrenamiento

Fuente: Elaboración propia

Si aplicamos el primer patrón a la red, la salida debería ser '01' tal como se muestra en la Figura 2. (Pixel negro representa '1' y pixel blanco representa '0'). Si aplicamos el segundo patrón a la red, la salida debería ser '10' y finalmente si aplicamos el tercer patrón a la red, la salida debería ser '11'. La entrada aplicada y la salida

deseada se denominan par de entrenamiento. Se aplican los patrones de entrenamiento reiterativamente hasta que el error en las neuronas de salida se reduce al mínimo global.

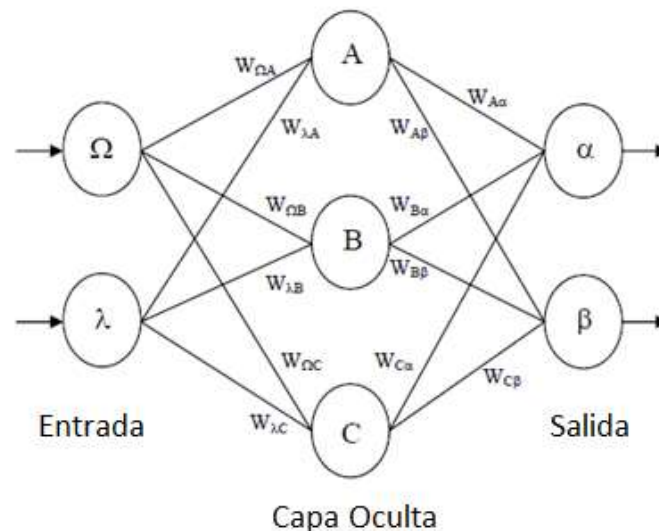


**Figura 2.** Red Neuronal

Fuente: The Backpropagation algorithm (“Algoritmo de retropropagación”)

### III. Aplicación del método

Considere la red neuronal de la Figura 3 para desarrollar los pasos del algoritmo.



**Figura 3.** Red Neuronal

Fuente: The Backpropagation algorithm (“Algoritmo de retropropagación”)

**PASO 1:** Calcular el error en las neuronas de salida.

$$\delta_{\alpha} = out_{\alpha} (1 - out_{\alpha}) (Target_{\alpha} - out_{\alpha})$$

$$\delta_{\beta} = out_{\beta} (1 - out_{\beta}) (Target_{\beta} - out_{\beta})$$

**Nota:** El término  $out_{\alpha} * (1 - out_{\alpha})$  es debido a la función de activación “Sigmoid”.

**PASO 2:** Actualizar los pesos en la capa de salida.

$$\begin{aligned} W_{A\alpha}^+ &= W_{A\alpha} + \eta \delta_{\alpha} \text{out}_A & W_{A\beta}^+ &= W_{A\beta} + \eta \delta_{\beta} \text{out}_A \\ W_{B\alpha}^+ &= W_{B\alpha} + \eta \delta_{\alpha} \text{out}_B & W_{B\beta}^+ &= W_{B\beta} + \eta \delta_{\beta} \text{out}_B \\ W_{C\alpha}^+ &= W_{C\alpha} + \eta \delta_{\alpha} \text{out}_C & W_{C\beta}^+ &= W_{C\beta} + \eta \delta_{\beta} \text{out}_C \end{aligned}$$

**PASO 3:** Calcular el error en cada neurona perteneciente a la capa oculta (Retropropagación).

$$\begin{aligned} \delta_A &= \text{out}_A (1 - \text{out}_A) (\delta_{\alpha} W_{A\alpha} + \delta_{\beta} W_{A\beta}) \\ \delta_B &= \text{out}_B (1 - \text{out}_B) (\delta_{\alpha} W_{B\alpha} + \delta_{\beta} W_{B\beta}) \\ \delta_C &= \text{out}_C (1 - \text{out}_C) (\delta_{\alpha} W_{C\alpha} + \delta_{\beta} W_{C\beta}) \end{aligned}$$

**Nota:** Debido a que no se puede calcular el error de cada neurona de la capa oculta directamente, se utiliza el error calculado en las neuronas de salida y se retroalimenta (de aquí viene el nombre del algoritmo) a las neuronas de la capa oculta a fin de calcular el error en cada una de ellas.

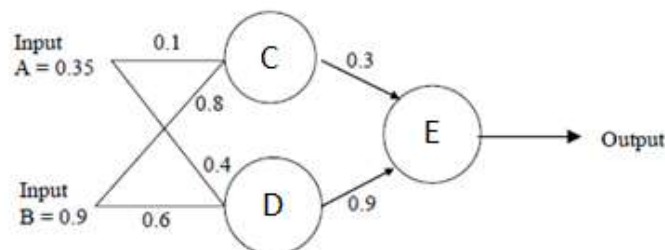
**PASO 4:** Actualizar los pesos en la capa oculta.

$$\begin{aligned} W_{\lambda A}^+ &= W_{\lambda A} + \eta \delta_A \text{in}_{\lambda} & W_{\Omega A}^+ &= W_{\Omega A} + \eta \delta_A \text{in}_{\Omega} \\ W_{\lambda B}^+ &= W_{\lambda B} + \eta \delta_B \text{in}_{\lambda} & W_{\Omega B}^+ &= W_{\Omega B} + \eta \delta_B \text{in}_{\Omega} \\ W_{\lambda C}^+ &= W_{\lambda C} + \eta \delta_C \text{in}_{\lambda} & W_{\Omega C}^+ &= W_{\Omega C} + \eta \delta_C \text{in}_{\Omega} \end{aligned}$$

**Nota:** El término  $\eta$  representa la tasa de aprendizaje y normalmente es igual a 1. Esta variable es utilizada para acelerar o desacelerar el aprendizaje requerido. Una vez actualizado todos los pesos de la red se repite el procedimiento hasta que el error generado en las salidas sea mínimo.

#### IV. Ejemplo Numérico

Considere la Figura 4 para el desarrollo del ejercicio planteado.



**Figura 4.** Ejemplo Cuantitativo

Fuente: The Backpropagation algorithm (“Algoritmo de retropropagación”)

Definimos las entradas y los pesos sinápticos de cada neurona.

Parámetro	Valor
Input_A	0.35
Input_B	0.9
W_AC	0.1
W_AD	0.4
W_BC	0.8
W_BD	0.6
W_CE	0.3
W_DE	0.9

**Tabla 1.** Parámetros de la red neuronal

Fuente: The Backpropagation algorithm (“Algoritmo de retropropagación”)

**Nota:** Se asume función de activación del tipo Sigmoid y salida deseada igual a 0.5 en la neurona final. Los valores iniciales para los pesos sinápticos típicamente son aleatorios al inicio del entrenamiento.

Realizamos el cálculo de entrada y salida para cada neurona.

- $\text{Input}_C = \text{Input}_A * W_{AC} + \text{Input}_B * W_{BC} = \mathbf{0.755}$
- $\text{Out}_C = 1 / (1 + \exp(-1 * \text{Input}_C)) = \mathbf{0.68}$
- $\text{Input}_D = \text{Input}_A * W_{AD} + \text{Input}_B * W_{BD} = \mathbf{0.68}$
- $\text{Out}_D = 1 / (1 + \exp(-1 * \text{Input}_D)) = \mathbf{0.6637}$
- $\text{Input}_E = \text{Out}_C * W_{CE} + \text{Out}_D * W_{DE} = \mathbf{0.80133}$
- $\text{Out}_E = 1 / (1 + \exp(-1 * \text{Input}_E)) = \mathbf{0.69}$

**PASO 1:** Calcular el error en la neurona de salida.

- $\text{Output\_Error} = (\text{SP} - \text{Out}_E) * (1 - \text{Out}_E) * \text{Out}_E = \mathbf{-0.0406}$

**PASO 2:** Actualizar los pesos en la capa de salida.

- $W_{CE\_UPDATE} = W_{CE} + \text{Output\_Error} * \text{Out}_C = \mathbf{0.272392}$
- $W_{DE\_UPDATE} = W_{DE} + \text{Output\_Error} * \text{Out}_D = \mathbf{0.87305}$

**PASO 3:** Calcular el error en cada neurona perteneciente a la capa oculta.

- $\text{Error}_C = \text{Output\_Error} * W_{CE\_UPDATE} * (1 - \text{Out}_C) * \text{Out}_C = \mathbf{-2.406 \times 10^{-3}}$
- $\text{Error}_D = \text{Output\_Error} * W_{DE\_UPDATE} * (1 - \text{Out}_D) * \text{Out}_D = \mathbf{-7.916 \times 10^{-3}}$

**PASO 4:** Actualizar los pesos en la capa oculta.

- $W_{AC\_UPDATE} = W_{AC} + \text{Error}_C * \text{Input}_A = \mathbf{0.09916}$

- $W_{BC\_UPDATE} = W_{BC} + Error\_C * Input\_B = \mathbf{0.7978}$
- $W_{AD\_UPDATE} = W_{AD} + Error\_D * Input\_A = \mathbf{0.3972}$
- $W_{BD\_UPDATE} = W_{BD} + Error\_D * Input\_B = \mathbf{0.5928}$

**PASO 5:** Aplicar pasos, 1, 2, 3, 4 y calcular nuevamente el error en la neurona final.

- Error anterior = Set Point – Salida Real =  $0.5 - 0.69 = \mathbf{-0.19}$
- Error nuevo =  $\mathbf{-0.18205}$

**Nota:** El nuevo error disminuyó al momento que se aplicó nuevamente el algoritmo con los pesos actualizados. El algoritmo se repite tantas veces hasta que el error final en la neurona de salida disminuye a un valor mínimo global.

