

ANALISIS DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
TACOMETRO BASADO EN DIFUSION MAGNETICA

Mariano Escamilla E.; Wilfredo Ziehlmann O.
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Santiago de Chile

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el diseño y construcción de un prototipo de un tacómetro de Difusión Magnética, de tal manera de obtener una característica de tensión de salida versus velocidad, tan lineal, como sea posible.

El prototipo construido por los autores bajo las condiciones anteriores de diseño es brevemente descrito. Además se dan a conocer los resultados experimentales, en forma de gráficos y comparados con las predicciones teóricas de un análisis unidimensional.

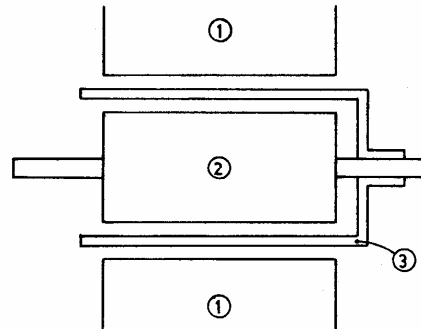
Finalmente se entregan las conclusiones, producto del análisis de los valores teóricos y experimentales, exponiéndose las causas de las discrepancias entre éstos últimos. Se indican los pasos a seguir; para mejorar la predicción teórica.

1.- INTRODUCCION

En sistemas rotatorios es necesario detectar la velocidad para fines de instrumentación, para estos efectos se emplean tacómetros. Los más usuales son : tacogeneradores de C.C ; C.A y lámparas estroboscópica.

El tacómetro de difusión magnética consiste principalmente en un estator externo donde van dispuestas 2 bobinas que se encuentran en cuadratura eléctrica, una bobina de referencia y una de control, el rotor consiste en una copa de material conductor no magnético (drag-cup), que va montada sobre un estator interno cilíndrico, de material magnético. En la figura 1 se muestra esquemáticamente el tacómetro de difusión magnética.

Al alimentar la bobina de referencia con una tensión alterna y si el rotor está detenido, la tensión de salida o de control es cero. Si el rotor se pone en movimiento, la tensión de salida es distinta de cero y es aproximadamente proporcional a la velocidad bajo ciertas consideraciones de diseño.



- 1.- Estator externo
- 2.- Estator interno
- 3.- Rotor (Drag-Cup)

Fig. 1. Tacómetro de difusión magnética.

El tacómetro de difusión magnética tiene las siguientes características :

- El rotor es de construcción sólida y de una sola pieza.
- El rotor no necesita ser bobinado.
- El rotor carece de ranuras.
- Posee bajo momento de inercia.
- Carece de contactor entre partes fijas y móviles.

En el tacómetro de difusión magnética la tensión de salida está libre del ripple ocasionado por las ranuras y demás asimetrías causadas por efectos magnéticos.

El diseño y construcción del prototipo se hace sobre la base de un modelo unidimensional desarrollado por los autores Hesmondhalgh y Laithwaite¹.

2.- PREDICCION TEORICA

Realizando ciertas aproximaciones¹ para el análisis del dispositivo de la figura 1, se encuentran las expresiones de las tensiones en la bobina de referencia y de control, planteando una solución particular de la

ecuación unidimensional del entrehierro, con la condición de operación con densidad de corriente forzada y bobina de control en circuito abierto.

Las ecuaciones relevantes son :

$$\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \frac{U_r U_s}{g \rho_s} \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{\mu_o}{g \rho_s} \frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\mu_o}{g} \frac{\partial J_s}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

Ecuación del entrehierro.

$$V_1 = K_1 \cdot m \cdot p \cdot \rho_s \cdot J_{s1} \cdot l \cdot \frac{\{(1-C^2+d^2)^2 + d^2(1+C^2+d^2)^2\}^{1/2}}{\{(1-C)^2+d^2\} \cdot \{(1+C)^2+d^2\}} \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_1) \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_1 = \text{tg}^{-1} \frac{d(1+C^2+d^2)}{(1-C^2+d^2)} \dots\dots\dots (3)$$

Tensión y ángulo de fase en la bobina de referencia.

$$V_2 = K_2 \cdot m \cdot p \cdot \rho_s \cdot J_{s1} \cdot l \cdot C \cdot \frac{\{(2d)^2 + (1-C^2-d^2)^2\}^{1/2}}{\{(1-C)^2+d^2\} \cdot \{(1+C)^2+d^2\}} \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_2) \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi_2 = \text{tg}^{-1} \frac{2 \cdot d}{\{C^2+d^2-1\}} \dots\dots\dots (5)$$

Tensión y ángulo de fase en la bobina de control.

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = K_1^2 \cdot m \cdot p \cdot \rho_s \cdot l \cdot \frac{\{(1-C^2+d^2)^2 + d^2(1+C^2+d^2)^2\}^{1/2}}{\{(1-C)^2+d^2\} \cdot \{(1+C)^2+d^2\}} \dots\dots\dots (6)$$

Impedancia de la bobina de referencia.

Con las ecuaciones 1) a la 6) se construyen los gráficos de las figuras 2) a la 4), tomando τW como parámetro.

De las curvas de la figura 4) se puede ver que mientras menor que la unidad es el parámetro τW , más lineal es la curva de la tensión de salida respecto de la velocidad. Luego el diseño del tacómetro queda prácticamente determinado por el parámetro τW .

3.- DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO.

El tacómetro construido consta de un estator externo similar al de las máquinas de inducción convencionales, de 24 ranuras con un diámetro interno de 79,5 (mm) y un diámetro externo de 152,5 (mm). La ranura tiene una profundidad de 17,5 (mm) y un ancho medio de 8,5 (mm), el ancho de diente es de 4,48 (mm), el largo axial es de 72 (mm).

Las bobinas de control y de referencia son idénticas. Se dispuso un devanado de doble capa y las bobinas que componen los devanados están conectadas en serie de modo que forman 2 pares de polos. Cada devanado tiene 1980 vueltas de conductor, calibre 25 (AWG).

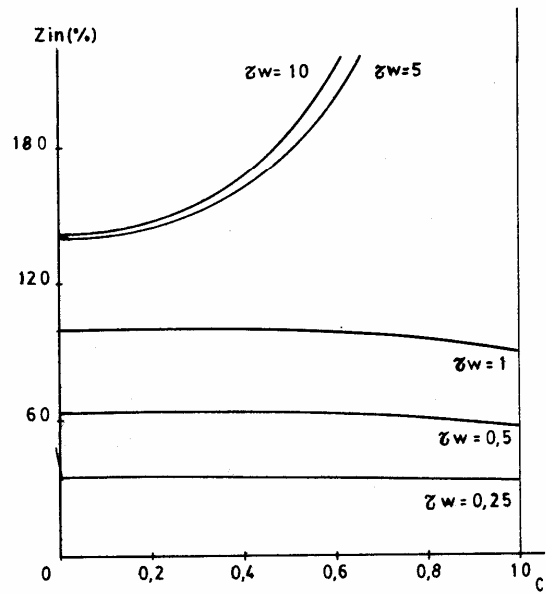


Fig. 2. Variación de la impedancia del entrehierro con la velocidad, (en %, referida al valor de Z_{in} con $c=0$, para $\tau w=1$).

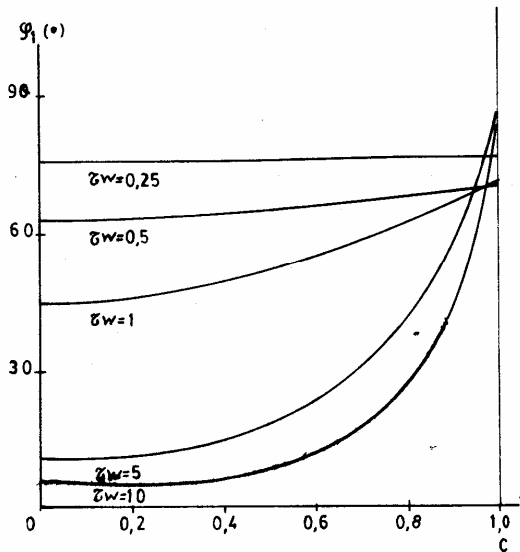


Fig. 3. Variación del ángulo de fase con la velocidad.

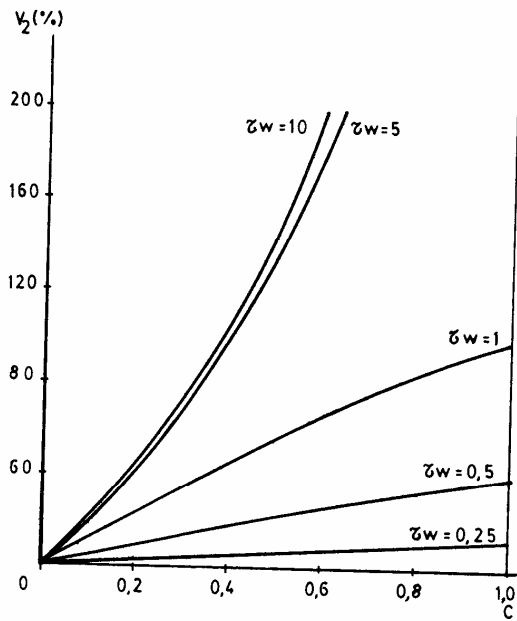


Fig. 4. Variación de la tensión de salida con la velocidad, operando bajo la condición de corriente forzada, (en %, referida al valor de V_2 con $c=1$, para $\tau_w=1$).

El rotor es de aluminio y tiene un diámetro medio de 73,25 (mm) con un espesor de 1(mm) y un largo axial de 101 (mm).

El diámetro del estator interno es de 67 (mm) y está formado por láminas de Hierro Silicoso al igual que el estator externo.

La bobina de referencia se alimenta con una corriente de 0,3(A). El parámetro τ_w se hizo variar, variando la frecuencia de la señal de referencia.

Los principales componentes del tacómetro se muestran en las fotografías de las figuras 5) a la 9).



Fig.5. Estator externo, con los bornes de conexión de las bobinas de control y referencia.

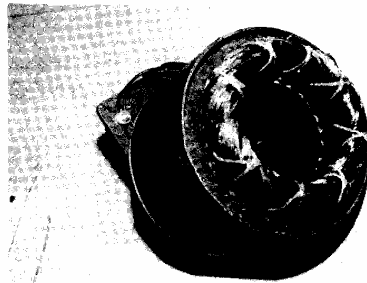


Fig. 6. Estator externo, con las bobinas de control y referencia alojadas en las ranuras.

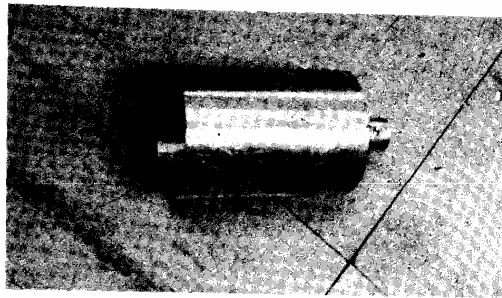


Fig. 7. Rotor tipo Drag-Cup del tacómetro.



Fig. 8. Estator interno y eje del tacómetro.



Fig. 9. Estator externo, rotor, estator interno y tapas del tacómetro.

4.- VERIFICACION EXPERIMENTAL.

Los valores experimentales se obtienen implementando el circuito de la figura 10. Para una corriente de 0,3(A) se midieron, la potencia, las tensiones de referencia y control (V_1 , V_2), la velocidad se midió con una lámpara estroboscópica calibrada.

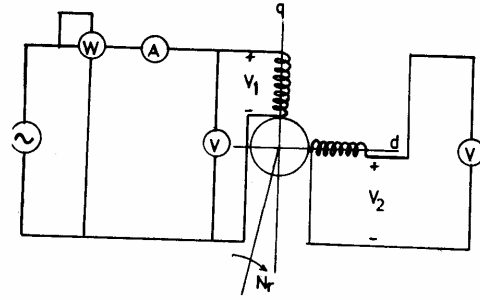
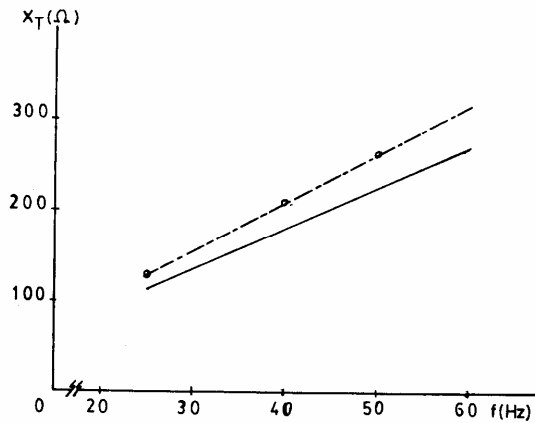


Fig. 10. Circuito de trabajo para las pruebas experimentales.

La reactancia total (magnetización más dispersión) fue medida experimentalmente, sacando el drag-cup y alimentando el enrollado de referencia con una tensión alterna.

En el gráfico de la figura 11 se puede ver la curva experimental y teórica de la reactancia total.



— Curva teórica
 - - - Curva experimental

Fig. 11. Curva de la variación de la reactancia con la frecuencia.

En las figuras 12 y 13 se encuentran los gráficos de la tensión de salida para $f=25$ Hz y $f=60$ Hz; $\tau_W = 0,434$ y $\tau_W = 1,041$ respectivamente.

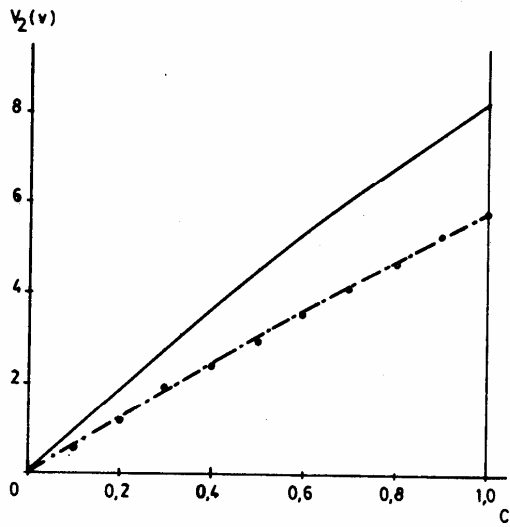


Fig. 12. Variación de la tensión de salida con la velocidad para $f=25$ (Hz) ; $\tau W = 0,434$.

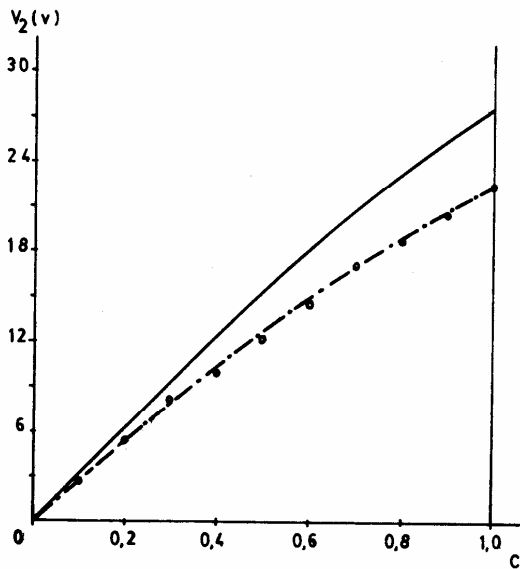


Fig. 13. Variación de la tensión de salida con la velocidad para $f=60$ (Hz) ; $\tau W = 1,041$.

— Curva teórica
 - - - Curva experimental

En los gráficos de las figuras 14 a la 17 se encuentran las curvas de la variación de la impedancia total, separadas en parte real (R_T) y parte imaginaria (X_T).

En los gráficos de las figuras 18 y 19 se encuentran las curvas de la variación del ángulo de fase.

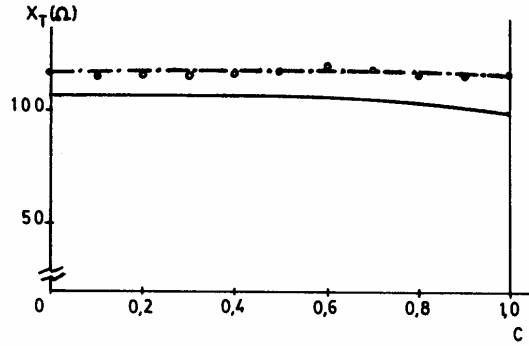


Fig. 14. Variación de X_T con la velocidad, para $f = 25$ (Hz) ; $\tau W = 0.434$

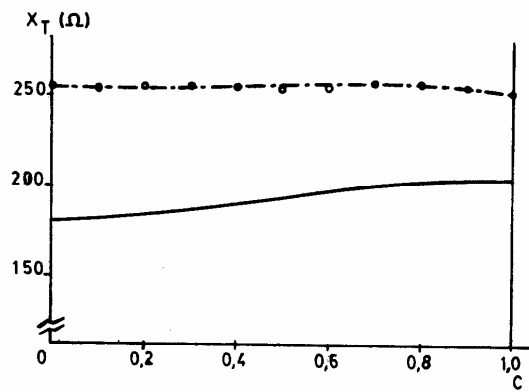


Fig. 15. Variación de X_T con la velocidad, para $f = 60$ (Hz) ; $\tau W = 1,041$.

— Curva teórica
 - - - Curva experimental.

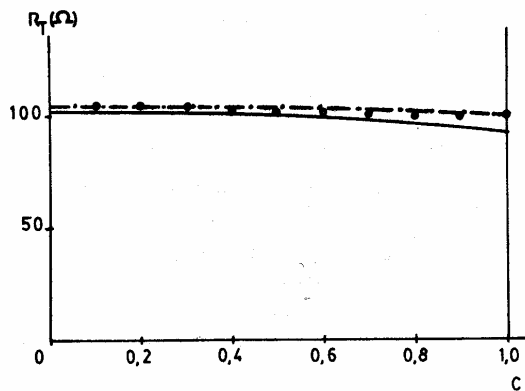


Fig. 16. Variación de R_T con la velocidad, para $f = 25$ (Hz) ; $\tau W = 0,434$.

— Curva teórica.
- - - Curva experimental.

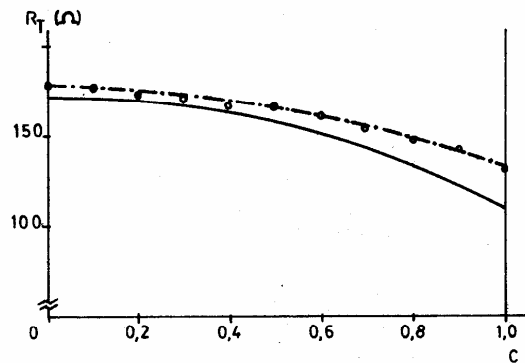


Fig. 17. Variación de R_T con la velocidad, para $f = 60$ (Hz) ; $\tau W = 1,041$.

— Curva teórica
- - - Curva experimental.

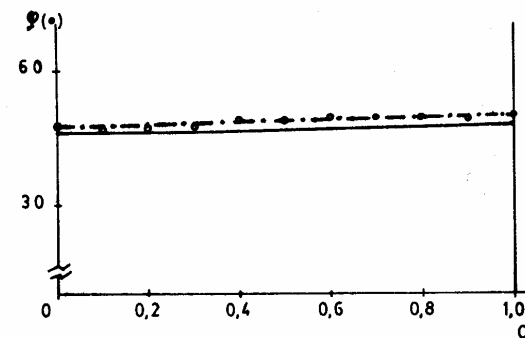


Fig. 18. Variación del ángulo de fase con la velocidad, para $f = 25$ (Hz) ; $\tau W = 0,434$.

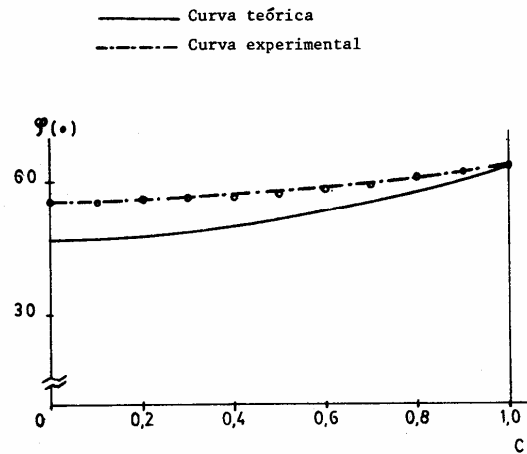


Fig. 19. Variación del ángulo de fase con la velocidad, para $f = 60$ (Hz), $\tau W = 1,041$.

— Curva teórica
- - - Curva experimental.

CONCLUSIONES

De acuerdo a las curvas de las figuras 12 y 13 la variación de la tensión de salida con la velocidad es prácticamente lineal, tanto para las curvas experimentales, como para las curvas teóricas. Además cuanto más se satisfaga la condición de $\tau W < 1$ más lineal es la característica de las curvas, cumpliéndose cualitativamente la predicción teórica. En las figuras se observa una clara discrepancia en las pendientes de las curvas.

En la figura 11 se encuentran graficadas la suma de las reactancias de dispersión y de magnetización. Del gráfico se puede observar que la curva experimental y la teórica varían linealmente con la frecuencia, pero dichas curvas tienen diferentes pendientes, la diferencia en las pendientes se debe a que las expresiones empleadas para el cálculo de las inductancias son aproximadas, siendo muchas de ellas de carácter empírico.

Las discrepancias entre las curvas teóricas y experimentales de la tensión de salida (gráficos de las figuras 12 y 13) se debe principalmente a que en el cálculo teórico no se ha tomado en cuenta el efecto transversal².

La distribución del flujo medio en el entrehierro, debido al efecto transversal, afectará el valor de la tensión de salida, haciendo disminuir dicho valor. La resistencia y la reactancia total, también se verán afectados por ciertos factores que en general dependen de la velocidad del rotor, τW , el paso polar y las dimen-

siones físicas del tacómetro.

Para mejorar la predicción teórica del análisis unidimensional sería necesario formular un modelo bidimensional de la ecuación del entrehierro, resolverlo para obtener la densidad de flujo del entrehierro y determinar las expresiones de la tensión de salida e impedancia total.

GLOSARIO DE SIMBOLOS

- K_1, K_2 : Densidad máxima de conductores.
 m : Paso polar
 p : número de pares de polos.
 ρ_s : resistividad superficial del material conductor del rotor.
 J_{s1} : densidad de corriente en la bobina de referencia.
 l : largo axial.
 U_r : velocidad del rotor.
 U_s : velocidad sincrónica.
 W : frecuencia angular de la tensión de referencia.
 τ : constante de tiempo del rotor.
 μ_o : permeabilidad del vacío.
 g : largo del entrehierro.
 b : campo de inducción magnético.

$$d = l/\tau W \quad ; \quad C = \frac{U_r}{U_s} \quad ; \quad U_s = \frac{m W}{\pi}$$

$$\tau = \frac{\pi^2 \mu_o}{\pi^2 \rho_s g}$$

BIBLIOGRAFIA

1. Hesmondhalgh and Laithwaite : "Method of analysing the properties of 2 phase servo-motor and A.C. tachometers", Proceedings of IEE, Vol. 110, N°11, Noviembre 1963 (2039-2054).
2. H. Boltón : "Transverse edge effect in sheet-rotor induction motor", Proceedings of IEE., Vol. 116, N°5, Mayo 1969, (725-731).
3. Francisco L. Singer : "Transformadores", (libro), tercera edición, Marcombo S.A., Barcelona, 1955.
4. Alexander S. Langsdorf : "Theory of alternating current machinery", (libro), segunda edición, Mc Graw-Hill Book Company, Inc. New York, 1955.
5. Michael Liwschitz - Garik and Clyde C. Whipple : "Máquinas de Corriente Alterna" (libro), cuarta

edición, Compañía Editorial Continental S.A., México, 1974.

6. John H. Kuhlmann : "Design of Electrical Apparatus", (libro), tercera edición, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1950.
7. Alfred Still and Charles S. Siskind : "Elements of Electrical Machine design", (libro), tercera edición, Mc Graw-Hill Book Company, Inc. New York, 1954.
8. Archer E. Knowlton : "Manual Standard del Ingeniero Electricista", (libro), octava edición, Labor S.A., Barcelona, 1953.
9. Herbert H. Woodson and James R. Melcher : "Electromechanical Dynamics", (libro), primera edición, John Wiley and Sons, Inc. New York, 1968.

BIOGRAFIAS



ESCAMILLA ESCAMILLA, MARIANO. Nació en San Carlos, Chile, el 5 de Diciembre de 1953. Título de Ingeniero de Ejecución Electricista en la Universidad Técnica del Estado de Santiago en 1979. Grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad de Santiago de Chile en 1982. Título de Ingeniero Civil Electricista en la Universidad de Santiago de Chile en 1984. En la actualidad trabaja como profesor de jornada parcial en el Departamento de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Santiago de Chile.



ZIEHLMANN OJEDA, WILFREDO. Nació en Lanco, Chile, el 24 de Abril de 1940. Obtuvo el Título de Ingeniero Civil Electricista en la Universidad de Santiago de Chile (Ex-Universidad Técnica del Estado) en 1962. En 1970 recibió el grado de Master en Ciencias Aplicadas en la Universidad de Toronto, Canadá. Desde 1963 a la fecha es Profesor a Jornada Completa del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Santiago de Chile, donde actualmente es Jefe del Area de Sistemas de Potencia. Se desempeñó como experto de la O.E.A. en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador, durante el año 1974. Fue Presidente del IV Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica en 1981. Es autor de varias publicaciones, presentadas en reuniones científicas nacionales e internacionales.