

*ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL*

Facultad de Ingeniería Eléctrica

*“ Técnicas para la determinación del
Comportamiento del Motor de Inducción ”*

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del título de:

Ingeniero en Electricidad

Especialización Potencia

Presentada por:

Edgar Sandoval Baquerizo

Guayaquil - Ecuador

1989



ING. HERNAN GUTIERREZ V.
Decano de la Facultad de
Ingeniería Eléctrica



ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
Director de Tesis



ING. ALBERTO HANZE B.
Miembro Principal



ING. JORGE FLORES M.
Miembro Principal

D E C L A R A C I O N E X P R E S A

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTAS EN ESTE INFORME TECNICO, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).



EDGAR SANDOVAL BAQUERIZO

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A ALEJANDRO

AGRADECIMIENTO

Al ING. GUSTAVO BERMUDEZ
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboración para
la realización de este
trabajo.

RESUMEN

La presente tesis analiza el valor práctico y el uso de los circuitos equivalentes "L" y "T" en la determinación del comportamiento del motor polifásico de inducción, derivados de las pruebas a rotor bloqueado y en vacío.

En los primeros capítulos se desarrollan las consideraciones teóricas necesarias para la determinación de las características del motor de inducción mediante el uso del diagrama de círculo, circuito equivalente "T" y circuito equivalente "L".

Posteriormente se realizan las pruebas necesarias para la determinación experimental de las características del motor y se comparan con los resultados teóricos obtenidos de los métodos anteriores mediante el uso de programas de computación desarrollados para el efecto.

De el análisis comparativo de estos resultados se determina el valor práctico y la precisión de cada uno de ellos en la determinación del comportamiento del motor polifásico de inducción.

INDICE GENERAL

PAGS.

RESUMEN -----

INDICE GENERAL -----

INDICE DE FIGURAS -----

INDICE DE TABLAS -----

INTRODUCCION -----

CAPITULO I

CIRCUITO EQUIVALENTE "T" DE LA MAQUINA DE
INDUCCION

1.1 ANALISIS DE LA MAQUINA UTILIZANDO EL CIRCUITO
"T" -----

1.2 PARAMETROS DE LA MAQUINA -----

1.3 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA
MAQUINA -----

CAPITULO II

CIRCUITO EQUIVALENTE "L" DE LA MAQUINA DE
INDUCCION

2.1 ANALISIS DE LA MAQUINA UTILIZANDO EL CIRCUITO
"L" -----

2.2 PARAMETROS DE LA MAQUINA -----

2.3 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA -----	
---	--

CAPITULO III

DIAGRAMA DE CIRCULO

3.1 DIAGRAMA DE CIRCULO APROXIMADO -----	
--	--

3.1.1 Determinación del diagrama circular aproximado -----	
---	--

3.2 DIAGRAMA DE CIRCULO EXACTO -----	
--------------------------------------	--

3.2.1 Deducción analítica del diagrama circular exacto -----	
---	--

3.2.1.1 Método de inversión -----	
-----------------------------------	--

3.3 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA -----	
---	--

CAPITULO IV

PRUEBAS EN MAQUINAS DE INDUCCION:

4.1 DETERMINACION DE RESISTENCIAS -----	
---	--

4.2 PRUEBA EN VACIO -----	
---------------------------	--

4.3 PRUEBA A ROTOR BLOQUEADO -----	
------------------------------------	--

4.4 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS -----	
---	--

4.5 PRUEBA DE CARGA -----	
---------------------------	--

CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO

5.1 PROGRAMAS DE COMPUTACION -----	
5.2 ANALISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES TECNICAS -----	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	
APENDICES -----	
BIBLIOGRAFIA -----	

INTRODUCCION

La problemática de encontrar ecuaciones directas que permitan determinar con exactitud las características del motor polifásico de inducción, se agudiza ya que la tendencia moderna de los fabricantes, es producir los motores sintetizando las especificaciones hechas por los clientes y las NEMA. Esto conduce a buscar ecuaciones a partir del circuito equivalente exacto, relacionadas a las características más importantes como son, torque y potencia de entrada, sumergiéndonos en sinnúmeras hipótesis y transformaciones del circuito equivalente original, pero sin embargo su validez práctica no queda perfectamente determinada. De aquí la importancia de realizar la valoración de los métodos diagrama de círculo, equivalente "L", y equivalente "T".

Aunque en nuestro medio industrial la problemática de la ingeniería eléctrica no es encontrar los valores de diseño, y por ende su objetivo no es buscar determinaciones precisas del comportamiento del motor de inducción, si no que es común tener que realizar pruebas en los motores eléctricos al carecer éstos de los datos

de placa necesarios o haber sido cambiadas sus condiciones de diseño al ser rebobinados.

Bajo estos lineamientos, la determinación de los parámetros reactivos es realizada, a partir de pruebas experimentales: a rotor bloqueado, de vacío, vacío ideal y medición directa. Estimándose las constantes del motor y estableciéndose los circuitos equivalentes "L" y "T".

Es necesario anotar que las constantes sufren una variación dependiendo del rango considerado, por lo tanto se determinan sus valores para el arranque y luego durante la operación. Siendo este rango el analizado es decir, los valores cercanos a la velocidad sincrónica que es el rango de operación de la máquina.

Una vez establecidos los circuitos equivalentes durante el rango de operación, se procede a calcular las características de la máquina, mediante el uso de programas de computación en lenguaje BASIC, que permiten un análisis completo de los resultados teóricos, para los distintos métodos propuestos.

Posteriormente, con el objeto de realizar la evaluación práctica de los resultados teóricos obtenidos, se lleva a cabo una prueba de carga, dentro del rango considerado. Del análisis comparativo de estos

resultados con los obtenidos teóricamente, se da una visión clara de cual método brinda mayores facilidades y exactitud en la determinación del comportamiento del motor, de importancia para el ingeniero eléctrico que se desenvuelve en nuestro medio.

CAPITULO I

CIRCUITO EQUIVALENTE "T" DE LA MAQUINA DE INDUCCION

1.1 ANALISIS DE LA MAQUINA UTILIZANDO EL CIRCUITO "T"

El desarrollo completo del circuito equivalente de la máquina de inducción es similar al del transformador. Realmente se ha demostrado que la máquina en reposo es un transformador con su bobinado secundario en cortocircuito. Las figuras 1.1 y 1.2 muestran los respectivos circuitos equivalentes.

Los efectos de la resistencia y de la reactancia de dispersión para efecto del circuito equivalente se los considera como elementos que se adicionan en serie tanto en el lado del primario como del secundario del circuito ideal, así también la corriente de magnetización da lugar a la existencia de una admitancia en paralelo en el circuito del primario.

La principal diferencia entre el motor de inducción

y el transformador radica en el hecho de que tanto el voltaje del rotor como su frecuencia son proporcionales al deslizamiento s . Cuando la velocidad del rotor es cero, el movimiento relativo del campo giratorio y las bobinas es el mismo, pero conforme la velocidad se incrementa hacia la velocidad sincrónica el deslizamiento se reduce aproximadamente a cero. Así se tiene que:

$$E_2 = sE_0$$

$$f_2 = sf_1$$

El motor de inducción es prácticamente un convertidor de frecuencia, teniendo la corriente del rotor una frecuencia igual a la frecuencia de deslizamiento. De esto se deduce que puesto que la reactancia es proporcional a la frecuencia, la reactancia de dispersión del secundario será también proporcional al deslizamiento, esto es:

$$X_2 = sX_2$$

De lo anteriormente mencionado se puede representar a la máquina ideal como un dispositivo que transforma los valores de entrada en razones determinadas por el deslizamiento y la constante de

transformación K.

En la figura 1.3 se representa esta máquina ideal en la cual el voltaje varía en la relación K/s, la corriente en 1/K y la frecuencia 1/s. La constante K, que para un transformador es la relación del número de vueltas del primario al secundario, en el motor de inducción sufre modificaciones introducidas por los factores de distribución tanto en el primario como en el secundario de donde:

$$K = K_1 n_1 / K_2 n_2$$

Finalmente en la figura 1.4 se representa el circuito equivalente obtenido al dividir el voltaje y la impedancia en el lado del rotor por el deslizamiento s.

Esto se justifica puesto que los valores de las corrientes permanecen inalterados después de esta transformación.

El circuito real del rotor vendría a ser de voltaje variable, reactancia variable y de valor resistivo constante. Pero si se observa desde el lado del primario aparece como de voltaje y reactancia constante y de resistencia variable.

La resistencia equivalente es representada por:

$$R_2 + (R_2/s - R_2)$$

expresión que tiene un valor fijo R_2 y una parte variable R_2/s la cual es mucho mayor que la parte fija R_2 puesto que s es una fracción. Por lo tanto de lo expuesto anteriormente, se puede decir que el motor de inducción está representado, por el circuito equivalente de un transformador conectado a una carga resistiva variable, la potencia entregada a ésta carga es la potencia mecánica que aparece en el eje del motor, incluidas las pérdidas mecánicas.

Es necesario puntualizar que el flujo magnético giratorio es debido a la resultante de las ondas de las dos fuerzas magnetomotrices producidas por las corrientes de los bobinados del rotor y del estator. Cuando el motor está a rotor bloqueado será obvio entonces, que las dos ondas giraran juntas y se combinarán para formar una sola onda que girará a la velocidad común.

Sin embargo cuando el motor gira tendrá un deslizamiento s , esto significa que gira a una velocidad $N_s(1-s)$, en éstas condiciones la frecuencia del rotor es sF_1 , y la onda de la fuerza

magnetomotriz se adelantará con respecto a los conductores del rotor en una velocidad correspondiente al valor sF_1 .

Especialmente esto significa que girará a la velocidad sincrónica con respecto a los conductores del bobinado del estator.

En otras palabras, no importa cual sea el valor que tome el deslizamiento s , siempre las dos ondas magnetomotrices girarán juntas y su resultante puede considerarse como producida únicamente por la corriente de magnetización I_0 actuando sola en el devanado del primario.

Los elementos del circuito equivalente "T" (figura 1.4), dependen de las dimensiones de los conductores utilizados en el devanado primario y en el secundario, así como también de los circuitos magnéticos principal y de dispersión; de esta aseveración se tiene como consecuencia que si estos valores pueden ser calculados de las dimensiones de diseño, quedaría determinado el circuito equivalente para ese caso particular.

De esta manera, asignándole una serie de valores al deslizamiento, se podrá computar los

correspondientes de las corrientes del rotor y del estator. Más aún, puesto que las pérdidas en los diferentes elementos resistivos del circuito equivalente pueden utilizarse para representar las diferentes fuentes de pérdidas de energía en la máquina bajo estudio, será posible estimar la eficiencia y el rendimiento de la máquina en particular.

Para mayor precisión en el análisis, el circuito utilizado debe ser el de la figura 1.4. Los valores relativos de X_1 y X_2 son mucho mayores que los correspondientes a un transformador y también la admitancia de magnetización es relativamente mucho mayor debido a la presencia del entrehierro.

Debe recordarse que todo análisis por medio de circuitos equivalentes involucra la teoría de linealidad y por lo tanto la constancia de los parámetros calculados. Los efectos de saturación magnética, pérdidas por acoplamiento, armónicas y condiciones variables de temperatura deben ser ignorados. El término "exacto" se lo utiliza para distinguirlo de otros circuitos equivalentes y no más bien por su precisión en la determinación del comportamiento del motor de inducción.

1.2 PARAMETROS DE LA MAQUINA

El circuito equivalente "T" de la figura 1.4 consiste de dos ramas paralelas; un ramal constante, el correspondiente al circuito de magnetización y el otro una reactancia constante en serie con una resistencia variable cuyo valor depende del deslizamiento s de la máquina.

Los valores de las resistencias R_1 y R_2 corresponden a las pérdidas en el cobre. La parte variable $R_2(1-s)/s$ es una resistencia efectiva la cual puede variar desde cero hasta infinito, correspondientemente desde la velocidad sincrónica hasta a rotor bloqueado.

Esta resistencia efectiva indica que al deslizamiento s el circuito pierde energía en una forma diferente a la que ocurre en el cobre de los bobinados, realmente, la energía que se pierde en esta forma es la que se convierte en trabajo mecánico.

Este valor es aproximadamente la salida mecánica de la máquina, pero con la inclusión de pequeñas pérdidas mecánicas que necesariamente tienen lugar. Los valores de las resistencias R_1 y R_2 son

estimados de las pruebas directas realizadas con diferentes instrumentos de medición y luego considerando factores de temperatura y efecto piel se determinan sus valores efectivos.

Para obtener los valores de los demás parámetros del circuito equivalente "T" es necesario la realización de dos pruebas adicionales en la máquina, éstas son la de vacío y la de rotor bloqueado respectivamente.

En la prueba de vacío la máquina se arranca en la forma usual, y se la opera a voltaje nominal sin aplicarle ninguna carga. Previamente se instalan instrumentos de medición con el objeto de calcular el valor I_0 y con el método de los dos vatímetros se establece la potencia P_0 , y de la relación de sus lecturas se obtiene así mismo el valor del factor de potencia.

En esta prueba se asume que la máquina corre casi a la velocidad sincrónica. Usualmente es aconsejable tomar una serie de lecturas a diferentes valores de voltaje aplicado, pudiendo este ser reducido a casi un tercio del valor normal antes de que la máquina desarrolle un deslizamiento apreciable.

En la prueba a rotor bloqueado, el eje de la máquina

debe ser trabado de tal manera que no se mueva cuando se conecte la energía. En el caso de los motores pequeños puede aplicarse el voltaje nominal por un período corto de tiempo, el suficiente para tomar las lecturas de los instrumentos de medición, debe tenerse el mayor cuidado para no sobrecalentar los embobinados de la máquina. Sin embargo con motores de mayor capacidad, esto no es posible usualmente porque el riesgo de ocasionar daños es mucho mayor. Por lo tanto se restringe el valor de la corriente hasta un máximo de una vez y media el valor de la corriente nominal y del voltaje correspondientemente. Se toman una serie de valores de lecturas de corriente y de factor de potencia con valores decrecientes de voltaje.

Bajo las condiciones de esta prueba el motor es un transformador cortocircuitado y presenta una impedancia prácticamente constante. El factor de potencia es sensiblemente constante y la corriente lineal con el voltaje. La extrapolación permite encontrar el factor de potencia y el valor de la corriente a voltaje nominal aún en el caso que no se lo haya alcanzado.

Con los valores medidos en las pruebas anteriores se determina las pérdidas fijas y las variables. Las

pérdidas fijas en el hierro debidas a la rotación y abertura de las ranuras y las de fricción y ventilación del rotor, a voltaje constante sufren muy pequeñas variaciones en el rango de trabajo. Las pérdidas en el hierro del estator dependen del valor del flujo, y las pérdidas por fricción y ventilación dependen de la velocidad, pero puesto que tanto el flujo como la velocidad son sensiblemente independientes de la carga, las pequeñas variaciones de las mismas no tienen mayor importancia. Al contrario, las pérdidas variables que son las que se sufren en el cobre del estator y rotor dependen completamente de la carga aplicada.

La suma de las pérdidas fijas y variables es prácticamente la totalidad del valor de la potencia consumida en la prueba en vacío. Están incluidas también las pérdidas en el cobre del estator debidas a la corriente de vacío I_0 . Las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables porque la corriente del rotor es sumamente pequeña. Pero para efectos de determinar el valor de la conductancia de magnetización es necesario establecer el valor de las pérdidas en el núcleo lo cual se logra mediante la aplicación de una prueba adicional llamada "Prueba de Vacío Ideal", la que consiste en llevar en la prueba de vacío al rotor mediante otra máquina

a la velocidad de sincronismo, con lo cual la corriente del rotor será nula y las pérdidas mecánicas serán proporcionadas por la máquina auxiliar.

De las pruebas descritas anteriormente y con los criterios expuestos se calculan todos los parámetros correspondientes al circuito equivalente "T".

1.3 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA

El circuito equivalente exacto de la figura 1.4, es representado exactamente por el de la figura 1.5 en el cual están los parámetros del circuito secundario referidos al primario. El circuito así considerado consiste en una red de dos mallas donde:

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$Z_0 = 1/Y_0$$

$$Z_2 = R_2/s + jX_2$$

La corriente en la primera malla es la que corresponde a la corriente del estator I_1 y la de la segunda malla a la del rotor referida al estator I_2 . Utilizando los métodos comunes para resolución de circuitos eléctricos, en éste caso el análisis de

mallas, se obtiene la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & -Z_b \\ -Z_b & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

donde:

$$Z_a = Z_1 + Z_o$$

$$Z_b = Z_o$$

$$Z_c = Z_2 + Z_o$$

Invirtiendo la ecuación matricial

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a & -Z_b \\ -Z_b & Z_c \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Resolviendo :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{V_1}{Z_a Z_c - Z_b^2} \begin{bmatrix} Z_c \\ Z_b \end{bmatrix}$$

Reemplazando:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{V_1}{Z_1 Z_2 + Z_o (Z_1 + Z_2)} \begin{bmatrix} Z_2 + Z_o \\ Z_o \end{bmatrix}$$

De esta ecuación puede determinarse el comportamiento del motor de inducción para el deslizamiento s . Puesto que:

$$\text{Corriente de entrada} = \text{mod. } I_1 = I_1$$

$$\text{Potencia de entrada} = \text{Re. } V_1 \times I_1$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia reactiva} \\ \text{de entrada } Q &= \text{Im. } V_1 \times I_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Factor de potencia} \\ \text{del estator} &= P / (P^2 + Q^2)^{1/2} \end{aligned}$$

$$\text{Corriente del rotor} = \text{Mod. } I_2 = I_2$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia de entrada} \\ \text{del rotor} &= I_2^2 R_2 / s \end{aligned}$$

$$\text{Potencia de salida} = I_2^2 (R_2 / s - R_2)$$

De la ecuación matricial anterior :

$$I_1 = V(Z_0 + Z_2) / [Z_1 Z_2 + Z_0(Z_1 + Z_2)]$$

$$I_2 = V_1 Z_0 / [Z_1 Z_2 + Z_0(Z_1 + Z_2)]$$

donde reagrupando se tendría:

$$I_2 = V / [(Z_0 + Z_1) Z_2 / Z_0 + Z_1]$$

reemplazando por sus respectivos valores el

denominador del segundo miembro de esta ecuación y racionalizando I_2 será igual a:

$$V / \{ [(R_o^2 + R_o R_1 + X_o^2 + X_1 X_o) + j(R_o X_1 - R_1 X_o)] / (R_o^2 + X_o^2) [(R_2/s + jX_2)] + (R_1 + jX_1)] \}$$

Si llamamos D al denominador tendríamos:

$$I_2 = V/D$$

$$D_{\text{real}} = [(R_o (R_o + R_1) + X_o (X_o + X_1)) R_2/s - (R_o X_1 - R_1 X_o) X_2] / (R_o^2 + X_o^2) + R_1$$

$$D_{\text{im}} = [(R_o (R_o + R_1) + X_o (X_o + X_1)) X_2 + (R_o X_1 - R_1 X_o) R_2/s] / (R_o^2 + X_o^2) + X_1$$

entonces el valor en magnitud será:

$$I_2(s) = V / [(D_{\text{real}} I_2)^2 + (D_{\text{im}} I_2)^2]^{1/2}$$

Una vez calculada I_2 en magnitud, y de acuerdo a las fórmulas anteriores procederemos a calcular las características de la máquina.

A continuación se presentan en la Tabla 1.1 los resultados del cálculo teórico del motor, utilizando las fórmulas anteriores deducidas para el circuito equivalente "T", así como también los gráficos correspondientes a velocidad vs. características de la máquina en las Figuras 1.6 a 1.14.

TABLA 1.1

RESULTADOS DEL CALCULO TEORICO UTILIZANDO EL CIRCUITO EQUIVALENTE *T*

N	S	Eff	FP	I1	I2	Pe	Pjs	Pgir	Pjr	Pod	Putil	Tutil
RPM	%	%	%	AMP	AMP	WTS	WTS	WTS	WTS	WTS	WTS	Lb-Pie
1787	0.72	44.02	29.05	3.21	0.56	354.88	98.46	197.65	1.43	196.23	156.23	0.62
1786	0.78	46.14	30.22	3.21	0.60	370.13	98.91	212.45	1.65	210.79	170.79	0.67
1785	0.83	48.08	31.38	3.22	0.64	385.34	91.39	227.18	1.89	225.29	185.29	0.73
1784	0.89	49.86	32.53	3.23	0.68	400.53	91.91	241.85	2.15	239.70	199.70	0.79
1783	0.94	51.49	33.66	3.24	0.73	415.70	92.46	256.47	2.42	254.05	214.05	0.85
1782	1.00	52.99	34.78	3.25	0.77	430.84	93.04	271.03	2.71	268.32	228.32	0.90
1781	1.06	54.38	35.88	3.26	0.81	445.95	93.65	285.53	3.01	282.51	242.51	0.96
1780	1.11	55.66	36.96	3.27	0.85	461.04	94.30	299.97	3.33	296.63	256.63	1.02
1779	1.17	56.85	38.04	3.28	0.89	476.10	94.98	314.35	3.67	310.68	270.68	1.07
1778	1.22	57.96	39.09	3.30	0.93	491.14	95.69	328.67	4.02	324.66	284.66	1.13
1777	1.28	58.99	40.13	3.31	0.98	506.15	96.44	342.94	4.38	338.56	298.56	1.18
1776	1.33	59.94	41.15	3.32	1.02	521.13	97.21	357.15	4.76	352.39	312.39	1.24
1775	1.39	60.84	42.16	3.34	1.06	536.09	98.02	371.30	5.16	366.14	326.14	1.29
1774	1.44	61.67	43.15	3.35	1.10	551.02	98.86	385.39	5.57	379.83	339.83	1.35
1773	1.50	62.45	44.12	3.37	1.14	565.92	99.73	399.43	5.99	393.44	353.44	1.40
1772	1.56	63.18	45.08	3.38	1.18	580.80	100.63	413.41	6.43	406.97	366.97	1.46
1771	1.61	63.87	46.02	3.40	1.22	595.65	101.56	427.32	6.88	420.44	380.44	1.51
1770	1.67	64.51	46.94	3.41	1.26	610.48	102.52	441.19	7.35	433.83	393.83	1.57
1769	1.72	65.12	47.85	3.43	1.31	625.27	103.51	454.99	7.84	447.16	407.16	1.62
1768	1.78	65.68	48.74	3.45	1.35	640.04	104.53	468.74	8.33	460.41	420.41	1.67
1767	1.83	66.22	49.61	3.46	1.39	654.78	105.58	482.43	8.84	473.58	433.58	1.73
1766	1.89	66.72	50.47	3.48	1.43	669.50	106.67	496.06	9.37	486.69	446.69	1.78
1765	1.94	67.19	51.31	3.50	1.47	684.19	107.78	509.64	9.91	499.73	459.73	1.83
1764	2.00	67.64	52.14	3.52	1.51	698.85	108.92	523.16	10.46	512.69	472.69	1.89
1763	2.06	68.06	52.94	3.54	1.55	713.48	110.09	536.62	11.03	525.59	485.59	1.94
1762	2.11	68.46	53.74	3.56	1.59	728.08	111.29	550.03	11.61	538.41	498.41	1.99
1761	2.17	68.83	54.51	3.58	1.63	742.66	112.51	563.37	12.21	551.17	511.17	2.04
1760	2.22	69.18	55.27	3.60	1.67	757.21	113.77	576.67	12.81	563.85	523.85	2.10
1759	2.28	69.51	56.02	3.62	1.71	771.73	115.06	589.90	13.44	576.47	536.47	2.15
1758	2.33	69.83	56.75	3.64	1.75	786.22	116.37	603.08	14.07	589.01	549.01	2.20
1757	2.39	70.13	57.46	3.66	1.79	800.68	117.71	616.20	14.72	601.48	561.48	2.25
1756	2.44	70.41	58.16	3.68	1.83	815.12	119.08	629.27	15.38	613.89	573.89	2.30
1755	2.50	70.67	58.84	3.70	1.87	829.53	120.47	642.28	16.06	626.23	586.23	2.35
1754	2.56	70.92	59.51	3.72	1.91	843.91	121.90	655.24	16.74	638.49	598.49	2.40
1753	2.61	71.15	60.17	3.74	1.95	858.26	123.35	668.14	17.45	650.69	610.69	2.45
1752	2.67	71.38	60.81	3.77	1.99	872.58	124.83	680.98	18.16	662.82	622.82	2.50
1751	2.72	71.59	61.43	3.79	2.03	886.87	126.33	693.77	18.89	674.88	634.88	2.55
1750	2.78	71.78	62.05	3.81	2.07	901.13	127.86	706.50	19.62	686.87	646.87	2.60
1749	2.83	71.97	62.65	3.83	2.11	915.37	129.42	719.18	20.38	698.80	658.80	2.65
1748	2.89	72.15	63.23	3.86	2.14	929.57	131.00	731.80	21.14	710.66	670.66	2.70
1747	2.94	72.31	63.81	3.88	2.18	943.75	132.61	744.36	21.92	722.45	682.45	2.75
1746	3.00	72.47	64.37	3.91	2.22	957.90	134.25	756.88	22.71	734.17	694.17	2.80
1745	3.06	72.61	64.92	3.93	2.26	972.02	135.91	769.33	23.51	745.82	705.82	2.85

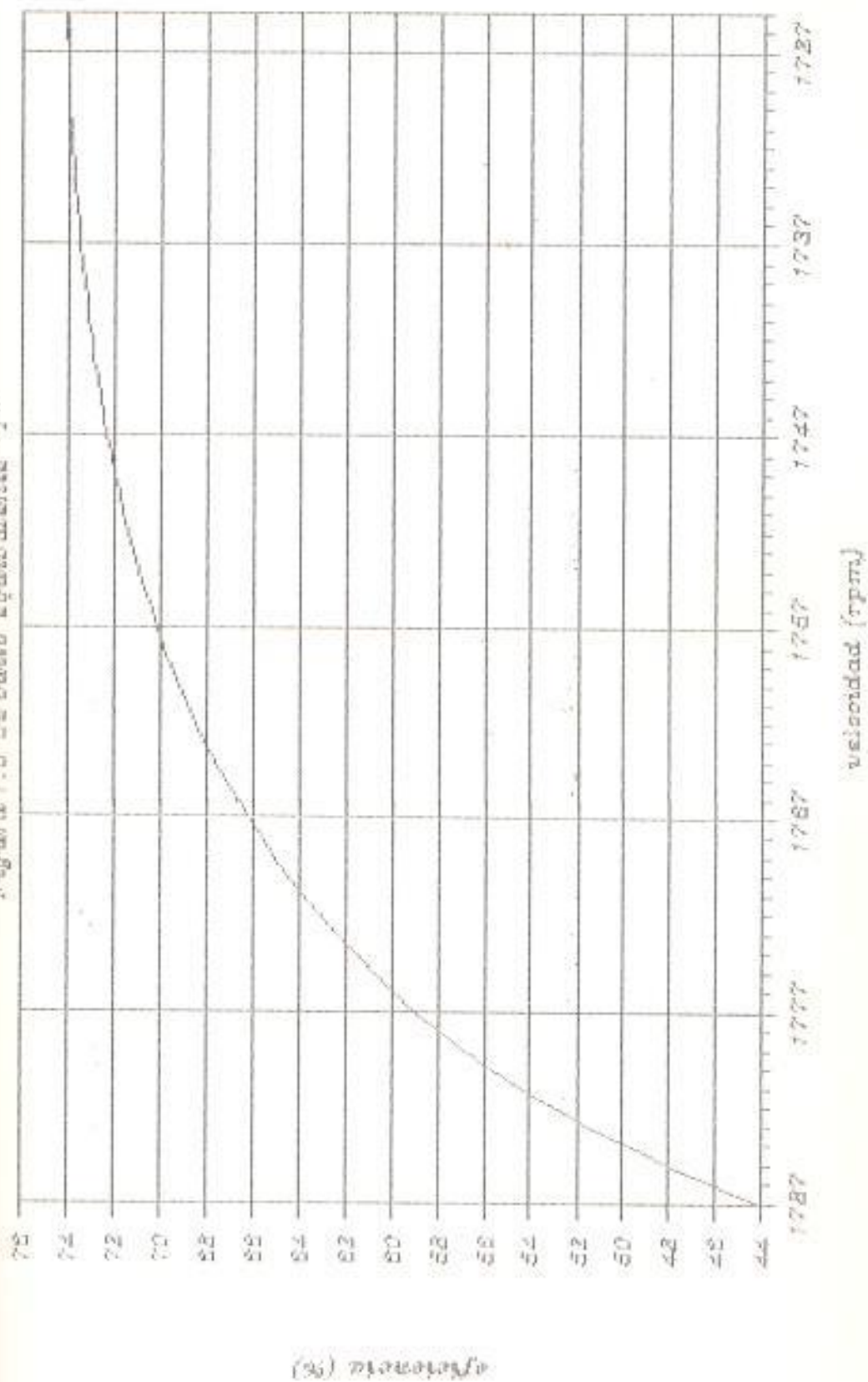
TABLA 1.1 (continuacion)

RESULTADOS DEL CALCULO TEORICO UTILIZANDO EL CIRCUITO EQUIVALENTE *T*

N	S	Eff	FP	I1	I2	Pe	Pjs	Pgir	Pjr	Pnd	Putil	tutil
RPM	%	%	%	AMP	AMP	WTS	WTS	WTS	WTS	WTS	WTS	Lb-Pie
1744	3.11	72.75	65.45	3.95	2.38	986.18	137.68	781.73	24.32	757.41	717.41	2.98
1743	3.17	72.88	65.98	3.98	2.34	1000.16	139.31	794.88	25.15	768.93	728.93	2.94
1742	3.22	73.00	66.49	4.00	2.38	1014.19	141.05	806.37	25.98	780.39	740.39	2.99
1741	3.28	73.12	66.99	4.03	2.42	1028.19	142.81	818.61	26.83	791.78	751.78	3.04
1740	3.33	73.22	67.48	4.05	2.45	1042.17	144.60	830.79	27.69	803.10	763.10	3.09
1739	3.39	73.32	67.96	4.08	2.49	1056.11	146.42	842.92	28.57	814.36	774.36	3.13
1738	3.44	73.41	68.42	4.10	2.53	1070.02	148.25	855.08	29.45	825.55	785.55	3.18
1737	3.50	73.50	68.88	4.13	2.57	1083.90	150.11	867.02	30.35	836.67	796.67	3.23
1736	3.56	73.58	69.33	4.16	2.61	1097.75	152.00	878.98	31.25	847.73	807.73	3.28
1735	3.61	73.65	69.76	4.18	2.64	1111.58	153.91	890.90	32.17	858.73	818.73	3.32
1734	3.67	73.72	70.19	4.21	2.68	1125.37	155.84	902.76	33.10	869.66	829.66	3.37
1733	3.72	73.79	70.60	4.23	2.72	1139.13	157.80	914.56	34.04	880.52	840.52	3.41
1732	3.78	73.84	71.01	4.26	2.76	1152.86	159.78	926.32	34.99	891.32	851.32	3.46
1731	3.83	73.90	71.41	4.29	2.80	1166.57	161.78	938.01	35.96	902.06	862.06	3.51
1730	3.89	73.95	71.80	4.31	2.83	1180.24	163.81	949.66	36.93	912.73	872.73	3.55
1729	3.94	73.99	72.18	4.34	2.87	1193.88	165.86	961.26	37.92	923.34	883.34	3.60
1728	4.00	74.03	72.55	4.37	2.91	1207.50	167.93	972.80	38.91	933.88	893.88	3.64
1727	4.06	74.06	72.91	4.40	2.95	1221.08	170.02	984.28	39.92	944.37	904.37	3.69
1726	4.11	74.09	73.27	4.42	2.98	1234.63	172.14	995.72	40.94	954.78	914.78	3.73
1725	4.17	74.12	73.61	4.45	3.02	1248.15	174.28	1007.10	41.96	965.14	925.14	3.78

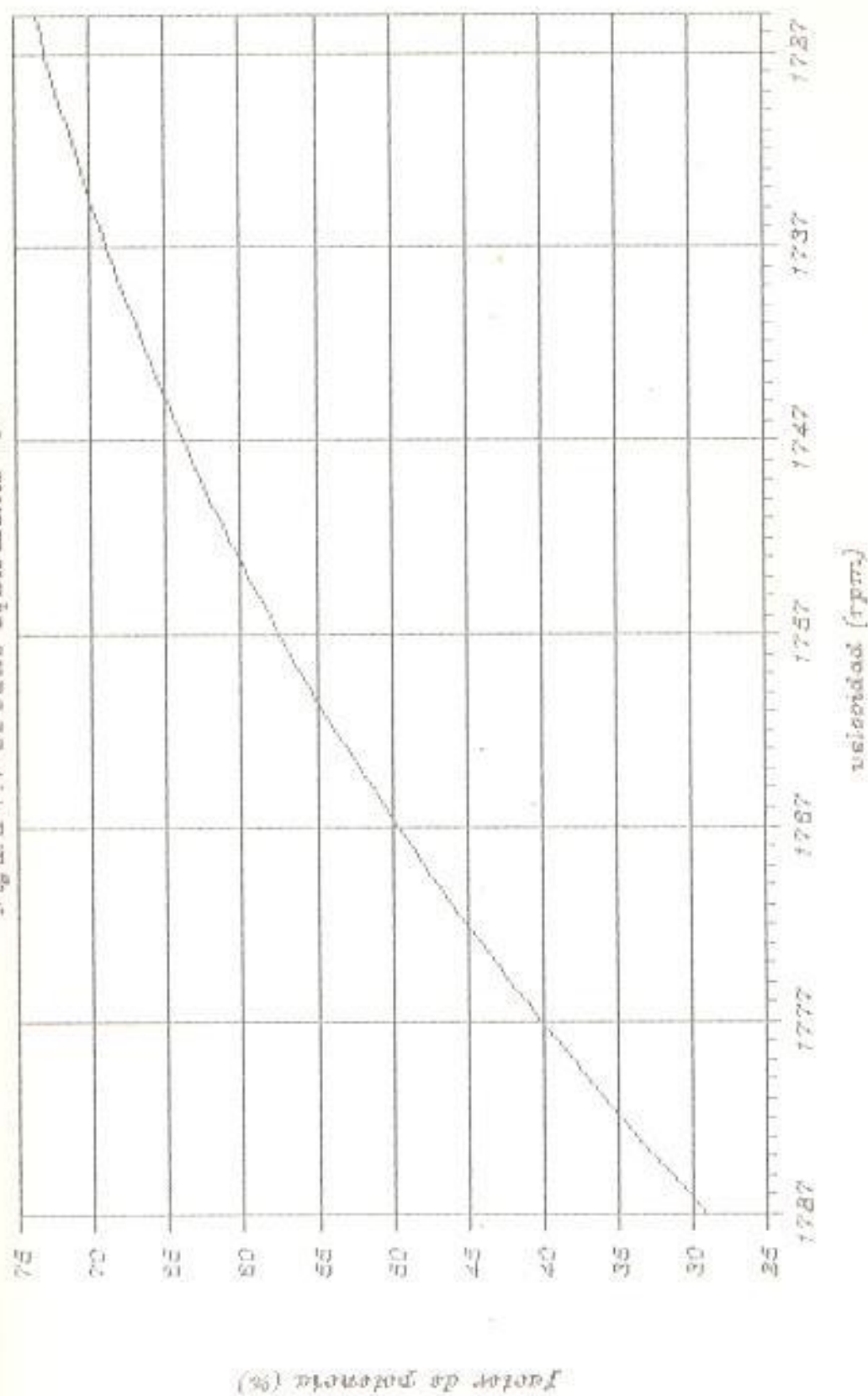
velocidad vs. eficiencia

Figura 1.8 Circuito equivalente rpm



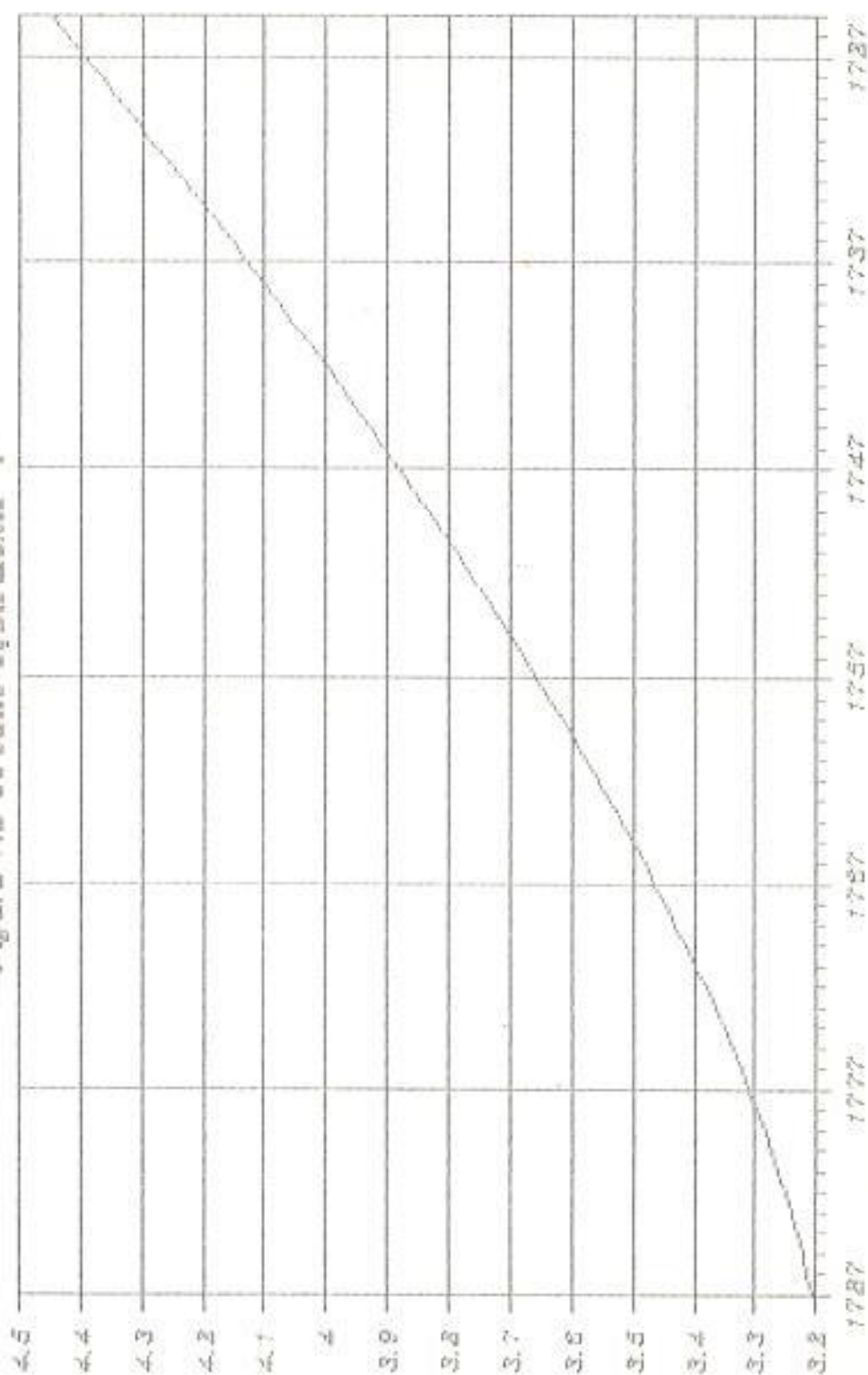
velocidad vs. factor de potencia

Figura 1.7 Circuito equivalente 1770



velocidad vs. I1

Figura 1.8 Circuito equivalente "T"

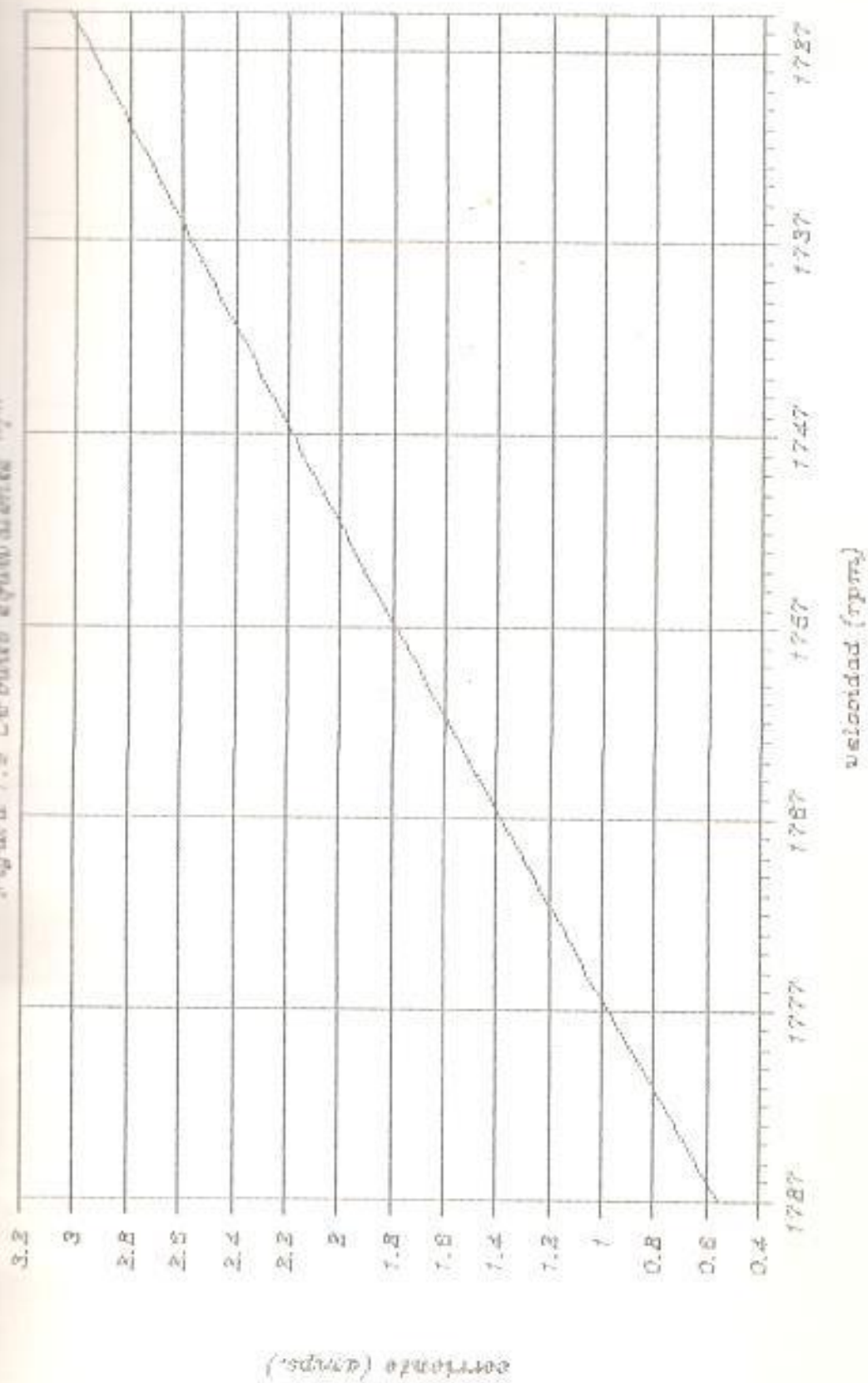


(corriente) amps

velocidad (rpm)

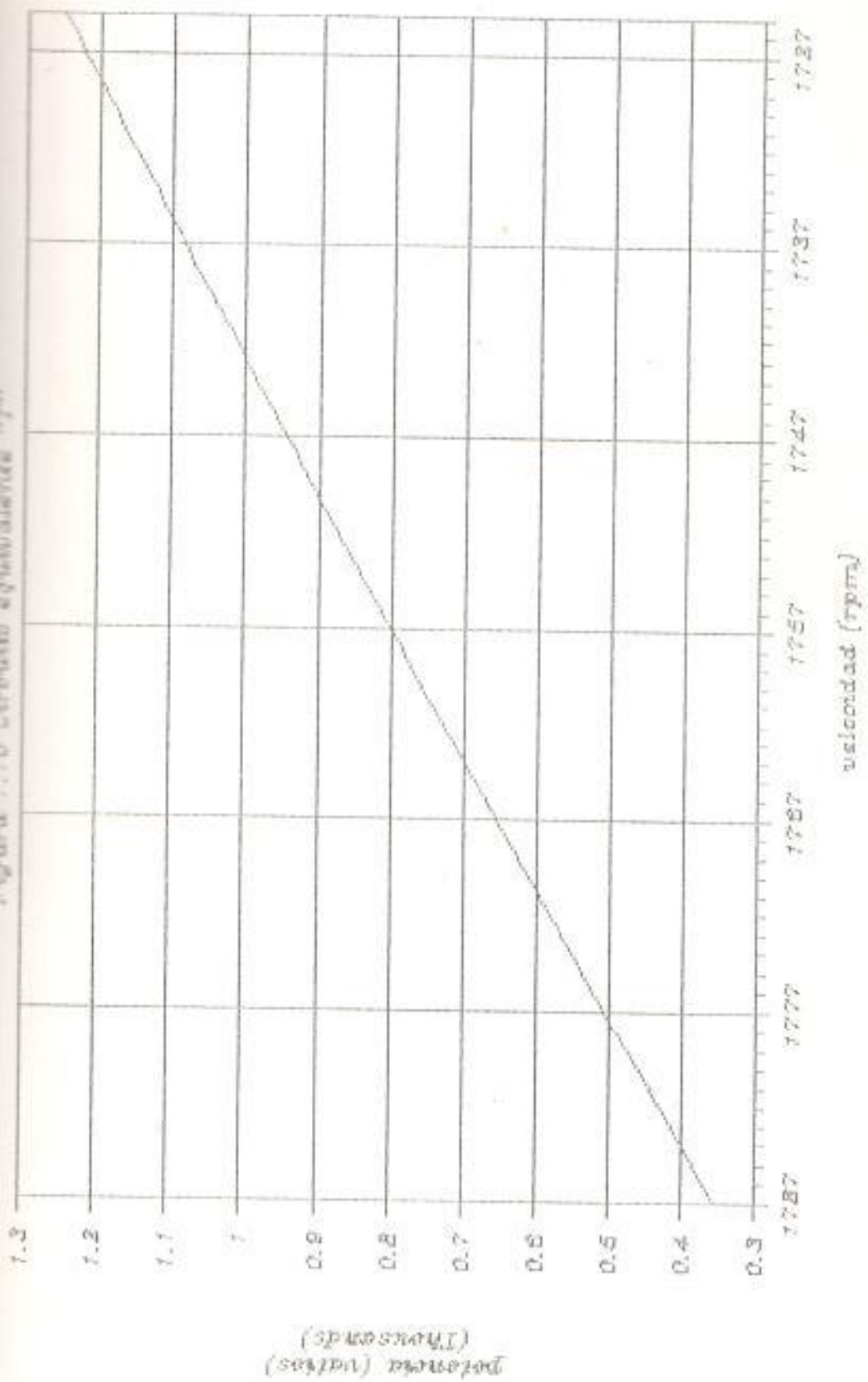
velocidad vs. 12

Figura 1.9 Circuito equivalente 1970



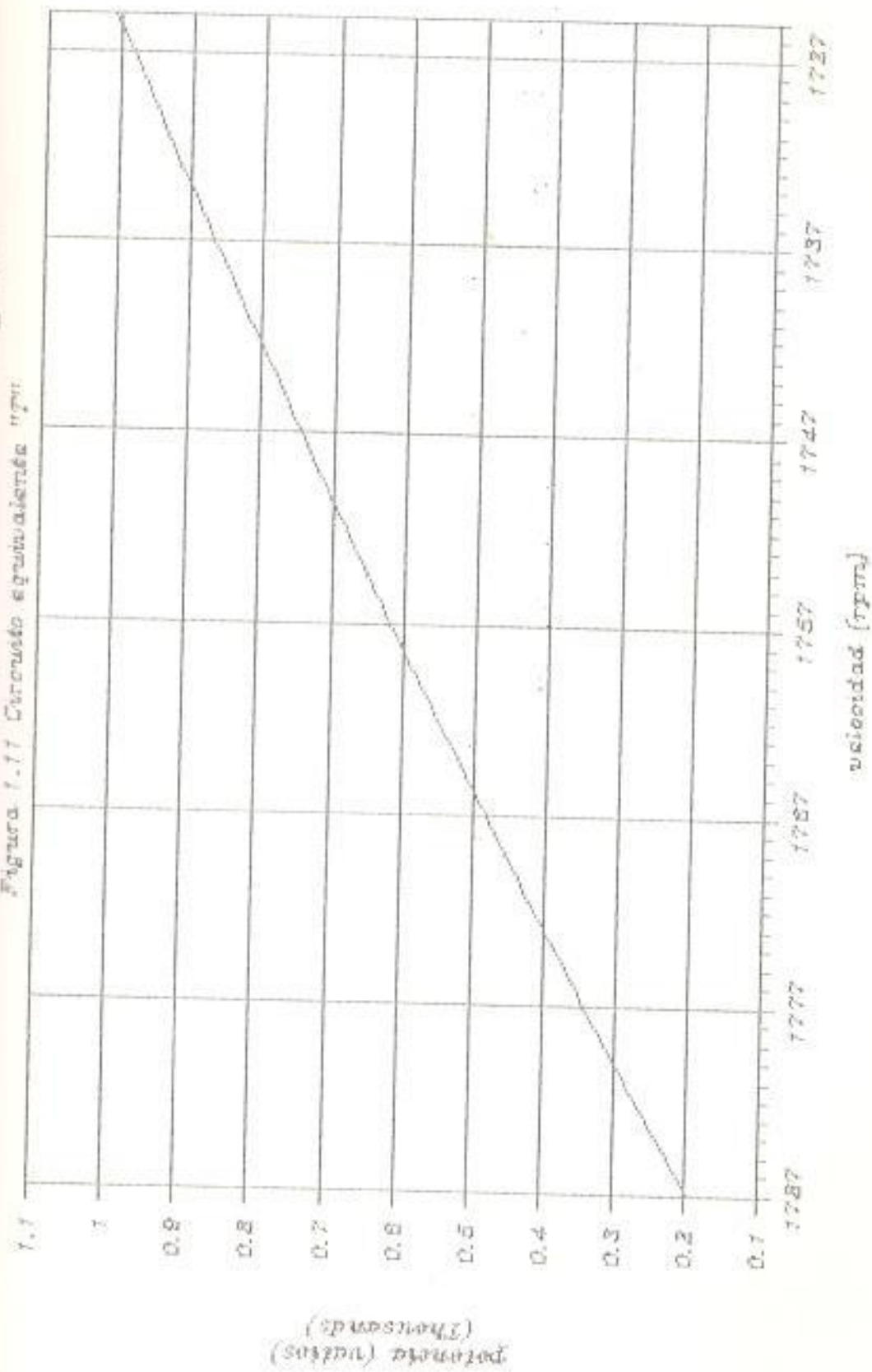
velocidad vs. potencia de entrada

Figura 1.10 Circuito equivalente "P"



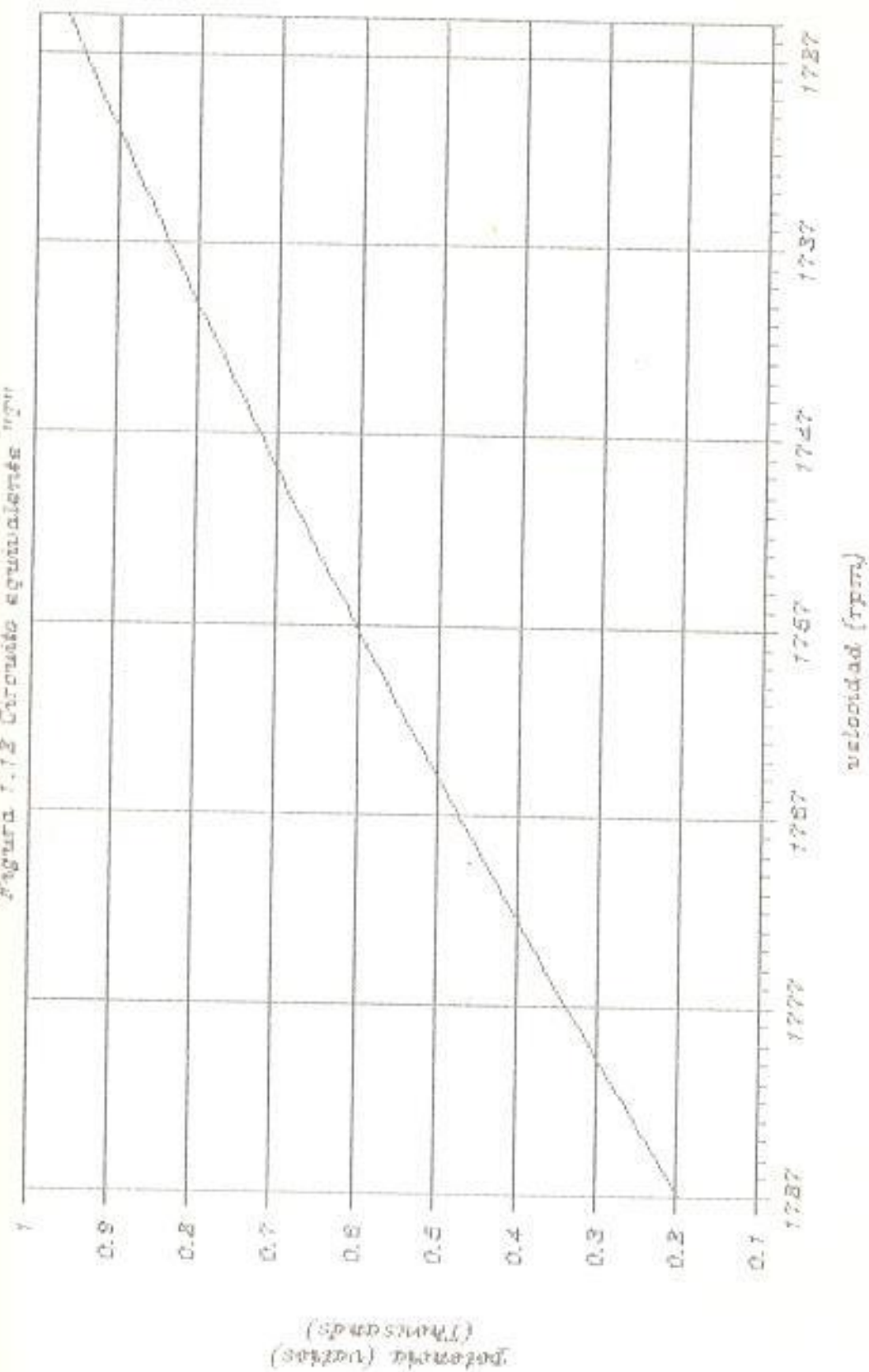
velocidad vs. potencia de giro

Figura 1.11 Circuito equivalente rpm



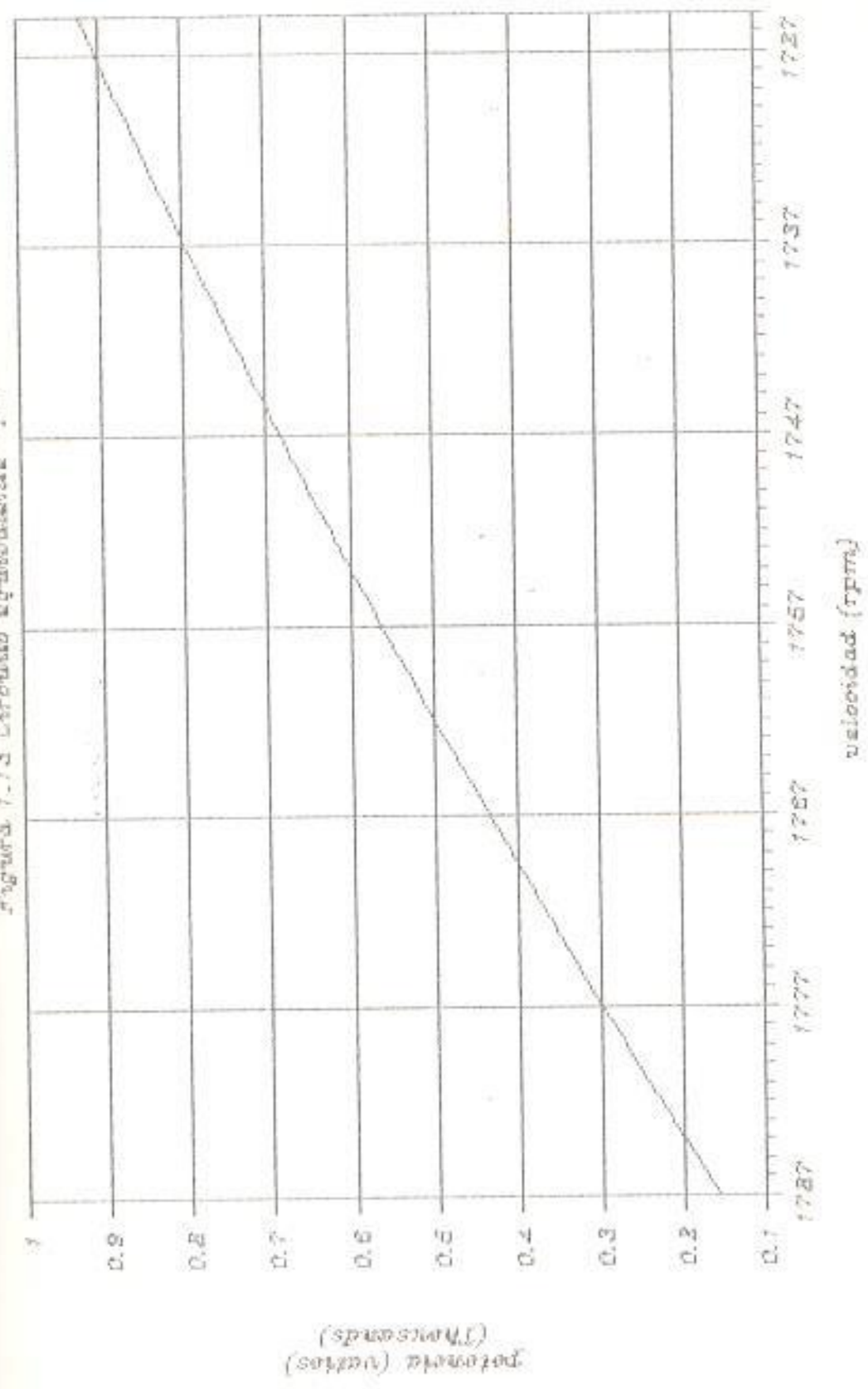
velocidad vs. potencia mec. des.

Figura 1.12 Circuito equivalente "PT"



velocidad vs. potencia util

Figura 1.13 Circuito equivalente "7"



velocidad vs. torque utili

Figura 1.14 Circuito equivalente "7"



CAPITULO II

CIRCUITO EQUIVALENTE "L" DE LA MAQUINA DE INDUCCION

2.1 ANALISIS DE LA MAQUINA UTILIZANDO EL CIRCUITO "L"

El uso del circuito equivalente "T" como lo desarrolló Steinmetz, para predecir el comportamiento del motor polifásico de inducción es generalmente bien aceptado. La precisión que se puede conseguir depende de la capacidad para obtener las constantes del circuito para un motor dado. Aún si fuere posible determinar los valores exactos de las constantes, se debe sacrificar la precisión por la facilidad de realización de los cálculos del comportamiento del motor. Se puede decir que es más importante, trabajar con un circuito aproximado que brinde mayores facilidades para el cálculo exacto del mismo que la utilización de un circuito cuyo cálculo sea tan sólo aproximado.

Esta pequeña introducción en sí deriva en la utilización del circuito aproximado "L" para el análisis del comportamiento del motor de inducción,

ya que ofrece un método más conveniente y versátil, que el "T", el cual parece más bien un ejercicio académico que no tiene ninguna importancia práctica.

En la teoría de los transformadores estáticos, el análisis del circuito equivalente se simplifica omitiendo completamente el ramal de excitación, sin embargo tal aproximación no es posible en las máquinas de inducción bajo condiciones normales de funcionamiento debido a que la presencia del entrehierro hace necesaria una mayor corriente de excitación y también la reactancia de dispersión es necesariamente mucho mayor.

Es posible manipular el circuito "T", a una forma más conveniente, si se traslada la admitancia de magnetización y se la ubica entre los terminales del primario como se muestra en la figura 2.1. Si se concentra los valores de R_1 y X_1 en Z_1 y los de R_2 y X_2 en Z_2 y el ramal shunt formado por los elementos R_0 y X_0 en Z_0 , se tendrá el circuito "T" de la figura 2.2 (a). Ahora mediante una simple transformación del circuito se obtiene el de la figura 2.2 (b), en dicho circuito no son afectadas las magnitudes de las entradas ni las salidas. De esta manera establecemos la validez del circuito equivalente "L" puesto que el circuito de la figura

2.2 (b) termina en un ramal en cortocircuito, descartado el cual se tiene el circuito equivalente "L" figura 2.2 (c), el cual se ha logrado mediante transformaciones de circuitos perfectamente válidas.

Existen sin embargo objeciones a este procedimiento para justificar el circuito "L" equivalente puesto que los elementos en serie y en paralelo no son los mismos que los de la figura 1.5. Pero debido a la naturaleza aproximada en la cual son determinados los parámetros es posible considerar las pérdidas en vacío como una constante total, representada por el ramal paralelo en la entrada al circuito equivalente. Esto justifica la utilización de estos valores de los elementos en serie y en paralelo del circuito equivalente "L".

Usando los valores referidos de la resistencia y de la reactancia de dispersión el circuito puede ser representado por la figura 2.1.

Se asume que la caída de voltaje en la reactancia de dispersión del primario debida a la corriente de magnetización es despreciable y esto permite cambiar la conexión de la admitancia de magnetización.

Este paso no es tan fácilmente justificable como en

El diagrama fasorial para este circuito se muestra en la figura 2.3.

El circuito equivalente "L" usado en la presente es el de la figura 2.1, donde se ha trasladado la admitancia de magnetización al primario.

2.2 PARAMETROS DE LA MAQUINA

La determinación de los valores de la resistencia tanto del rotor como la del estator se estiman directamente mediante la aplicación de voltaje de corriente continua tanto al rotor como al estator y la medición respectiva de los valores de voltaje y corriente. Para la estimación del valor de R_2 o sea la resistencia del rotor referida al estator se la hace a partir de los resultados de la prueba a rotor bloqueado. Este método es preferible a el cálculo de la misma de la medición directa con aplicación de voltaje continuo y luego referirla al estator, esto se hace para evitar los errores que se introducen cuando se usa la relación de transformación.

Para la obtención de los valores de R_1 y de $X_1 + X_2$ a usarse en el circuito equivalente "L", los valores de la prueba a rotor bloqueado son usados de la

siguiente forma:

$$R = \text{Potencia de la prueba a rotor bloqueado} / (\text{Corriente a rotor bloqueado})^2$$

Por lo tanto R_2 será igual a:

$$R - R_1$$

Así mismo:

$$Z = V_{cc} / I_{cc}$$

de donde

$$X_1 + X_2 = (Z^2 - R^2)^{1/2}$$

De esta manera los valores de los parámetros vitales R_2 y $X_1 + X_2$ son determinados mediante la utilización simple de los valores de la prueba a rotor bloqueado sin extrapolación. Los valores de la potencia a rotor bloqueado, de la corriente de cortocircuito y el voltaje son tomados por fase y el valor de R_1 es determinado como se describió anteriormente.

2.3 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA

De el análisis de este circuito podemos deducir por observación :

$$I_1 = V_1 ((G_o - jB_o) + 1/[L(R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2)])$$

Lo cual significa que la corriente del primario I_1 es igual a la suma de dos componentes:

$$I_o = V_1 (G_o - B_o)$$

o la otra

$$I_2 = V_1 / [L(R_1 + R_2/s) + j(X_1 + X_2)]$$

Por otra parte el valor total de la carga del motor está incluido en R_2/s pero como

$$R_2/s = R_2 + R_2[(1-s)/s]$$

el circuito equivalente de la figura 2.1 puede volverse a trazar convirtiéndose en el de la figura 2.4. Donde la resistencia R_2 es el valor propio de la impedancia de la máquina y el valor $R_2[(1-s)/s]$ que representa a una resistencia variable es el equivalente análogo eléctrico de la carga mecánica de la máquina. Por esta razón el motor de inducción puede ser considerado como un generador que alimenta

una resistencia variable ficticia.

La potencia mecánica desarrollada se deduce fácilmente de la figura 2.4, ya que claramente se vé que la potencia por fase suministrada al motor es:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \text{ vatios.}$$

Una parte de esta potencia se consume como pérdidas óhmicas en los devanados del primario y del secundario y la restante se convierte en potencia mecánica. Así mismo no toda la potencia mecánica desarrollada resulta útil en el eje ya que existen pérdidas debidas a las resistencias pasivas, por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo. Las pérdidas por estas causas son tomadas en cuenta por la admitancia de excitación que en el circuito equivalente "L" está a la entrada del primario y tienen el valor de:

$$P_o = V_1 I_o \cos \theta_o \text{ vatios por fase}$$

Por lo tanto la potencia mecánica neta de salida por fase es:

$$P = V_1 I_1 \cos \theta_1 - I_1^2 (R_1 + R_2) - V_1 I_o \cos \theta_o$$

pero

$$I_1 \cos \theta_1 = I_2 \cos \theta_2 + I_0 \cos \theta_0$$

entonces de acuerdo al circuito de la figura 2.4 se deduce que:

$$I_2 = V_1 / [(R_1 + R_2 + R_2(1-s)/s)^2 + (X_1 + X_2)^2]^{1/2}$$
$$= V_1 / Z_t$$

9

$$\cos \theta_2 = [R_1 + R_2 + R_2(1-s)/s] / Z_t$$

substituyendo

$$P = V_1^2 R_2(1-s) / s [(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2]$$

ecuación que da la potencia de salida por fase en función del deslizamiento s , siendo constantes todos los otros términos de la expresión.

Además como

$$I_2^2 = V_1^2 / [(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2]$$

se deduce:

$$P = I_2^2 R_2 (1-s)/s$$

Esto significa que la potencia mecánica desarrollada por fase puede considerarse como las pérdidas óhmicas en una resistencia ficticia del secundario de un valor $R_2(1-s)/s$ ohmios por fase.

También se puede convertir a:

$$P = E_2 I_2 (1-s) \cos \theta_2$$

como las pérdidas del cobre en el secundario son iguales a:

$$I_2^2 R_2$$

se deduce que la potencia eléctrica de entrada al secundario será:

$$P + I_2^2 R_2 \text{ por fase}$$

también se tiene que

$$P + I_2^2 R_2 = I_2^2 R_2 / s$$

de donde se deduce que la potencia eléctrica de entrada al secundario por fase es igual a las pérdidas en el cobre del secundario por fase divididas para el deslizamiento.

Así mismo el par motor se calcula a partir del valor de P deducido anteriormente.

$$T = 7.04 \times m_1 P = 7.04 \times m_1 I_2^2 R_2 / s$$

Esta ecuación establece que el producto del par motor por el deslizamiento es proporcional a las pérdidas totales en el cobre del secundario, lo cual significa que en reposo ($s=1$) el par motor es directamente proporcional a la resistencia del secundario, indicando esto que un par de arranque elevado requerirá una resistencia rotórica elevada.

De esta forma hemos establecido todas las fórmulas necesarias para el cálculo del comportamiento del motor de inducción a partir del circuito equivalente "L".

En la tabla 2.1 se presentan tabulados los valores calculados a partir de las fórmulas anteriormente descritas para el circuito equivalente "L"; así como también los gráficos de las curvas características correspondientes.

TABLA 2.1

RESULTADOS DEL CALCULO TEORICO UTILIZANDO EL CIRCVITO EQUIVALENTE *L*

N	S	Eff	FP	I1	I2	Pe	Pjs	Pgir	Pjr	Pad	Putil	Tutil
RPM	%	%	%	AMP	AMP	WTS	WTS	WTS	WTS	WTS	WTS	Lb-Pie
1787	0.72	61.79	22.20	3.45	0.59	291.62	3.07	221.79	1.60	220.10	180.10	0.71
1786	0.78	63.66	23.42	3.46	0.63	308.65	3.55	238.33	1.85	236.48	196.48	0.77
1785	0.83	65.31	24.62	3.47	0.68	325.64	4.06	254.81	2.12	252.68	212.68	0.84
1784	0.89	66.78	25.80	3.49	0.72	342.59	4.61	271.21	2.41	268.80	228.80	0.90
1783	0.94	68.10	26.96	3.50	0.77	359.50	5.20	287.53	2.72	284.82	244.82	0.97
1782	1.00	69.28	28.11	3.51	0.81	376.38	5.81	303.79	3.04	300.75	260.75	1.03
1781	1.06	70.34	29.24	3.53	0.86	393.21	6.46	319.97	3.38	316.60	276.60	1.09
1780	1.11	71.30	30.35	3.55	0.90	410.01	7.15	336.09	3.73	332.35	292.35	1.16
1779	1.17	72.18	31.45	3.56	0.95	426.76	7.86	352.13	4.11	348.02	308.02	1.22
1778	1.22	72.97	32.52	3.58	0.99	443.48	8.61	368.10	4.50	363.68	323.68	1.28
1777	1.28	73.69	33.58	3.60	1.03	460.15	9.39	383.99	4.91	379.09	339.09	1.34
1776	1.33	74.35	34.62	3.61	1.08	476.79	10.20	399.82	5.33	394.49	354.49	1.41
1775	1.39	74.95	35.65	3.63	1.12	493.39	11.05	415.57	5.77	409.88	369.88	1.47
1774	1.44	75.50	36.65	3.65	1.16	509.95	11.92	431.26	6.23	425.03	385.03	1.53
1773	1.50	76.01	37.64	3.67	1.21	526.47	12.83	446.87	6.70	440.16	400.16	1.59
1772	1.56	76.47	38.61	3.69	1.25	542.95	13.77	462.41	7.19	455.22	415.22	1.65
1771	1.61	76.90	39.56	3.71	1.29	559.39	14.74	477.88	7.70	470.18	430.18	1.71
1770	1.67	77.30	40.49	3.73	1.34	575.79	15.74	493.28	8.22	485.05	445.05	1.77
1769	1.72	77.66	41.40	3.75	1.38	592.15	16.77	508.61	8.76	499.85	459.85	1.83
1768	1.78	77.99	42.30	3.78	1.42	608.47	17.83	523.87	9.31	514.56	474.56	1.89
1767	1.83	78.30	43.18	3.80	1.47	624.75	18.92	539.06	9.88	529.18	489.18	1.95
1766	1.89	78.58	44.04	3.82	1.51	640.99	20.04	554.18	10.47	543.72	503.72	2.01
1765	1.94	78.85	44.88	3.84	1.55	657.19	21.19	569.23	11.07	558.17	518.17	2.07
1764	2.00	79.09	45.71	3.87	1.59	673.35	22.37	584.22	11.68	572.53	532.53	2.13
1763	2.06	79.31	46.52	3.89	1.64	689.47	23.57	599.13	12.32	586.81	546.81	2.18
1762	2.11	79.51	47.31	3.91	1.68	705.55	24.81	613.97	12.96	601.01	561.01	2.24
1761	2.17	79.70	48.08	3.94	1.72	721.59	26.08	628.75	13.62	615.12	575.12	2.30
1760	2.22	79.88	48.84	3.96	1.76	737.59	27.37	643.45	14.30	629.16	589.16	2.36
1759	2.28	80.03	49.59	3.99	1.81	753.55	28.69	658.09	14.99	643.18	603.18	2.41
1758	2.33	80.18	50.31	4.01	1.85	769.47	30.04	672.66	15.70	656.97	616.97	2.47
1757	2.39	80.31	51.02	4.04	1.89	785.35	31.42	687.16	16.42	670.75	630.75	2.53
1756	2.44	80.44	51.72	4.07	1.93	801.19	32.83	701.60	17.15	684.45	644.45	2.58
1755	2.50	80.55	52.40	4.09	1.97	816.99	34.26	715.96	17.90	698.06	658.06	2.64
1754	2.56	80.65	53.07	4.12	2.01	832.75	35.72	730.26	18.66	711.60	671.60	2.70
1753	2.61	80.74	53.72	4.15	2.06	848.47	37.21	744.49	19.44	725.05	685.05	2.75
1752	2.67	80.82	54.35	4.17	2.10	864.15	38.72	758.65	20.23	738.42	698.42	2.81
1751	2.72	80.90	54.98	4.20	2.14	879.78	40.27	772.75	21.04	751.71	711.71	2.86
1750	2.78	80.96	55.58	4.23	2.18	895.38	41.83	786.78	21.85	764.92	724.92	2.92
1749	2.83	81.02	56.18	4.26	2.22	910.94	43.43	800.74	22.69	778.05	738.05	2.97
1748	2.89	81.07	56.76	4.28	2.26	926.45	45.05	814.64	23.53	791.10	751.10	3.03
1747	2.94	81.12	57.33	4.31	2.30	941.93	46.69	828.47	24.39	804.07	764.07	3.08
1746	3.00	81.16	57.88	4.34	2.34	957.37	48.36	842.23	25.27	816.96	776.96	3.13
1745	3.06	81.19	58.43	4.37	2.38	972.76	50.06	855.93	26.15	829.78	789.78	3.19

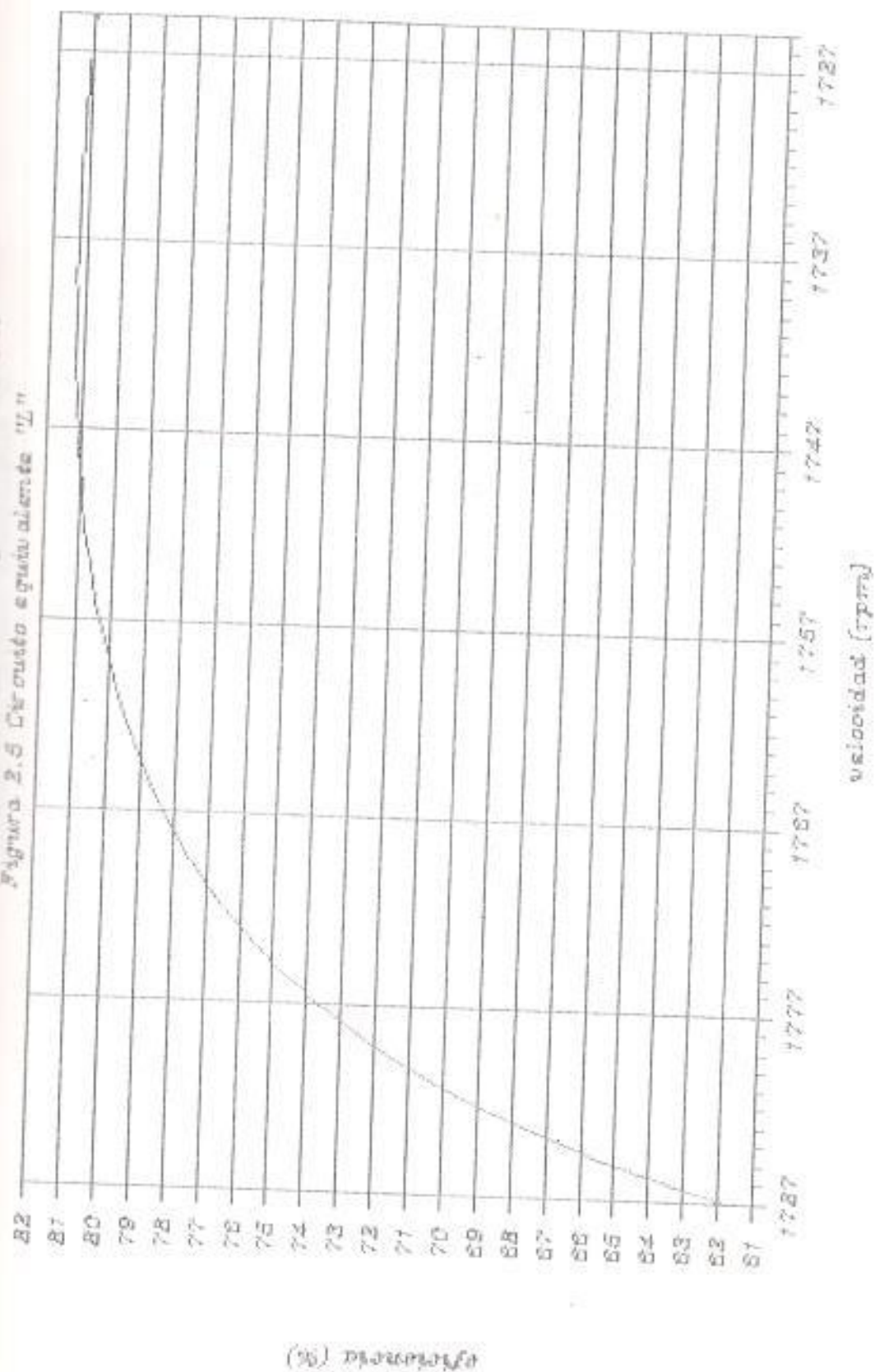
Tabla 2.1 (continuación)

RESULTADOS DEL CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO EL CIRCUITO EQUIVALENTE "L"

S	Eff	FP	I1	I2	Pe	Pjs	Pgir	Pjr	Pnd	Putil	Tutil	
SPM	%	%	AMP	AMP	WTIS	WTIS	WTIS	WTIS	WTIS	WTIS	Lb-Pie	
0744	3.11	81.22	58.96	4.48	2.43	588.11	51.78	869.56	27.05	842.51	882.51	3.24
0743	3.17	81.24	59.48	4.43	2.47	1003.43	53.53	883.13	27.97	855.16	815.16	3.29
0742	3.22	81.25	59.98	4.46	2.51	1018.70	55.30	896.63	28.89	867.74	827.74	3.35
0741	3.28	81.27	60.48	4.49	2.55	1033.93	57.10	910.07	29.83	880.24	840.24	3.40
0740	3.33	81.27	60.97	4.52	2.59	1049.13	58.92	923.44	30.78	892.66	852.66	3.45
0739	3.39	81.28	61.44	4.55	2.63	1064.28	60.76	936.74	31.75	905.00	865.00	3.50
0738	3.44	81.27	61.90	4.58	2.67	1079.39	62.63	949.98	32.72	917.26	877.26	3.55
0737	3.50	81.27	62.35	4.61	2.71	1094.46	64.53	963.16	33.71	929.45	889.45	3.60
0736	3.56	81.26	62.80	4.64	2.75	1109.49	66.44	976.28	34.71	941.56	901.56	3.66
0735	3.61	81.25	63.23	4.67	2.79	1124.48	68.38	989.33	35.73	953.60	913.60	3.71
0734	3.67	81.23	63.65	4.70	2.83	1139.43	70.35	1002.31	36.75	965.56	925.56	3.76
0733	3.72	81.21	64.06	4.73	2.87	1154.34	72.33	1015.23	37.79	977.44	937.44	3.81
0732	3.78	81.19	64.47	4.76	2.91	1169.21	74.34	1028.09	38.84	989.25	949.25	3.86
0731	3.83	81.16	64.86	4.79	2.95	1184.03	76.37	1040.89	39.90	1000.99	960.99	3.91
0730	3.89	81.13	65.25	4.82	2.99	1198.82	78.43	1053.62	40.97	1012.65	972.65	3.96
0729	3.94	81.10	65.62	4.85	3.02	1213.57	80.51	1066.29	42.06	1024.23	984.23	4.01
0728	4.00	81.07	65.99	4.88	3.06	1228.27	82.61	1078.90	43.16	1035.74	995.74	4.06
0727	4.06	81.03	66.35	4.92	3.10	1242.94	84.73	1091.44	44.26	1047.18	1007.18	4.11
0726	4.11	80.99	66.70	4.95	3.14	1257.57	86.87	1103.93	45.38	1058.54	1018.54	4.15
0725	4.17	80.95	67.05	4.98	3.18	1272.15	89.03	1116.35	46.51	1069.83	1029.83	4.20

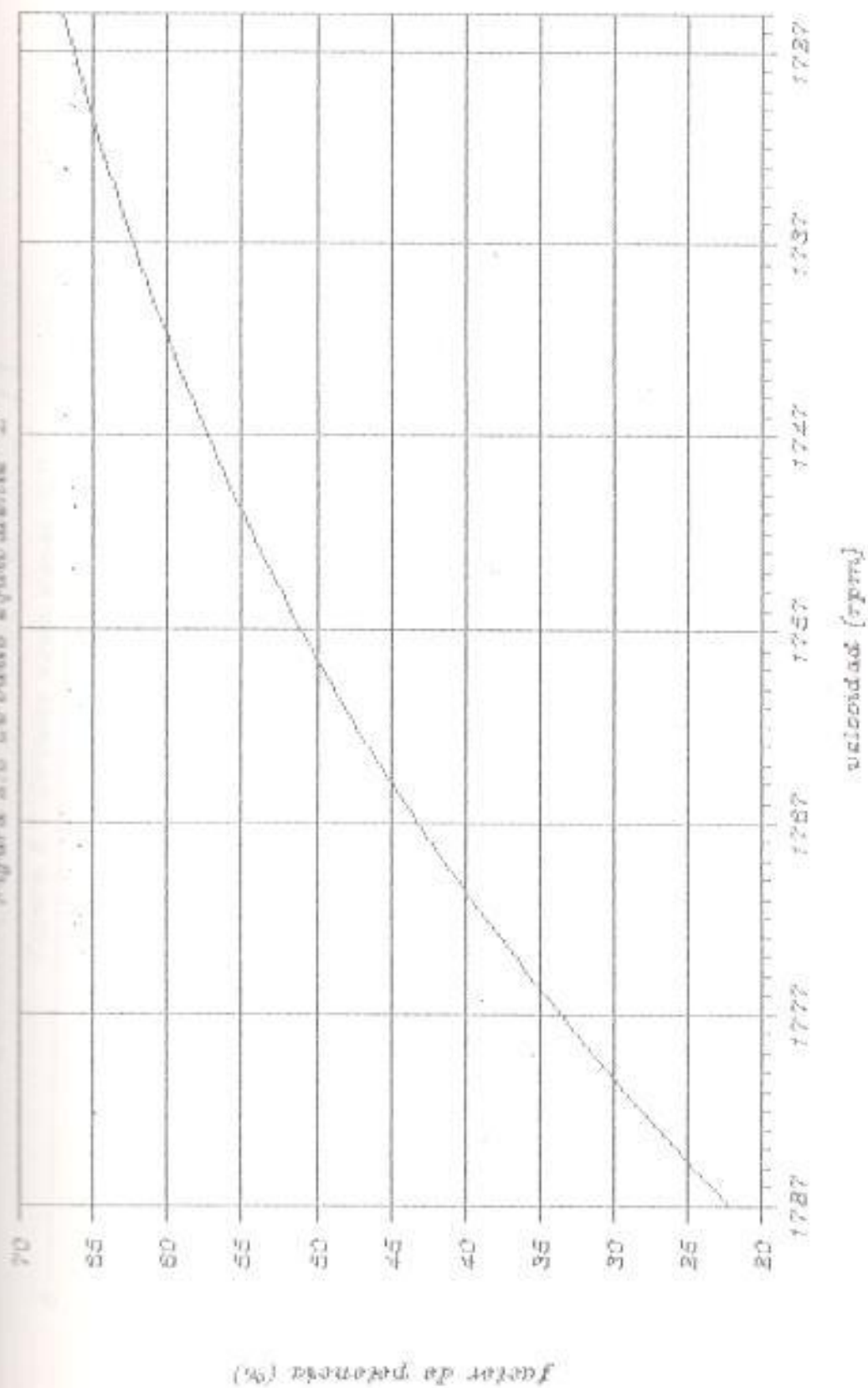
velocidad vs. eficiencia

Figura 2.5 Circuito equivalente "L"



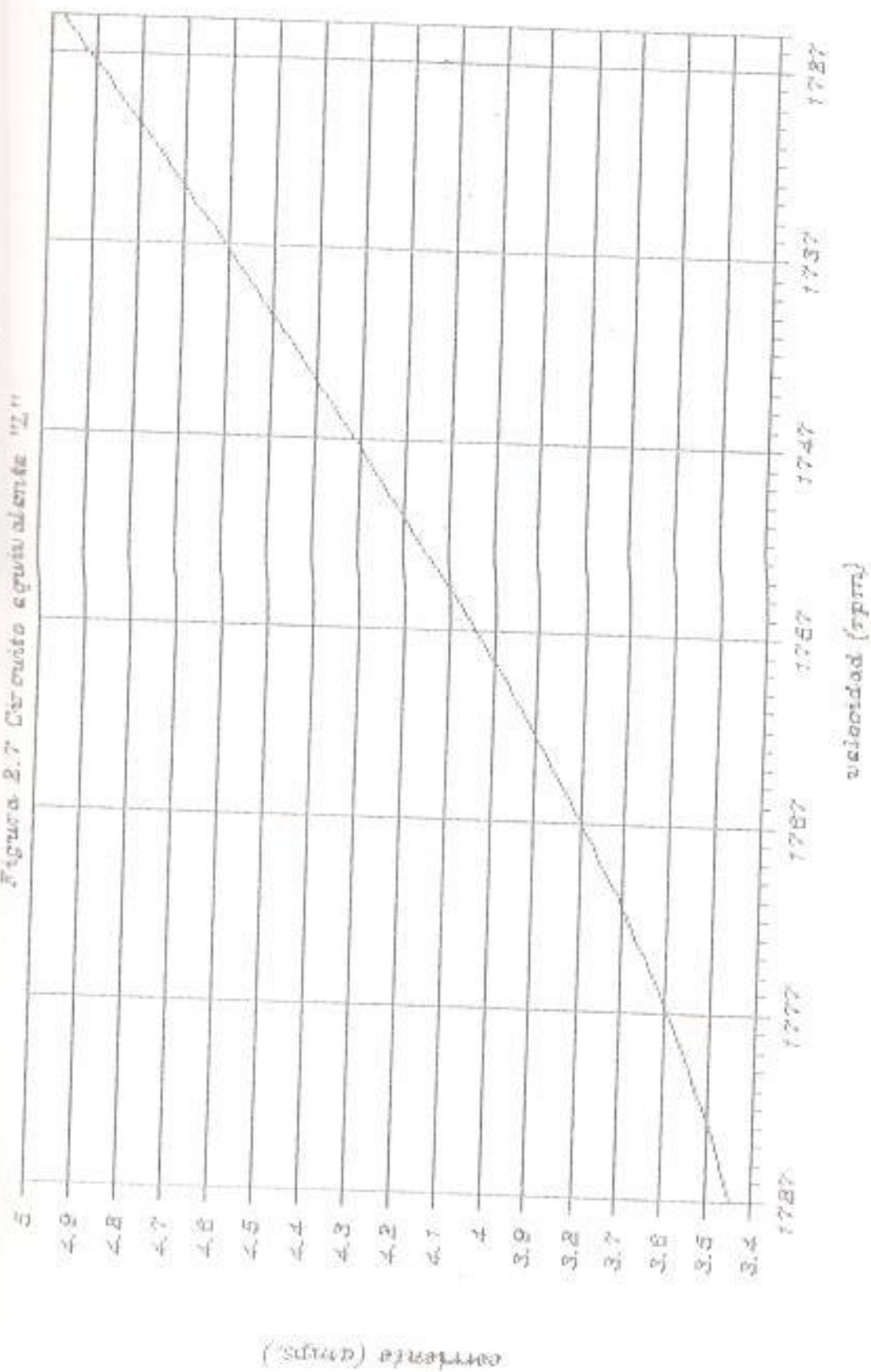
velocidad vs. factor de potencia

Figura 3.6 Circuito equivalente "2"



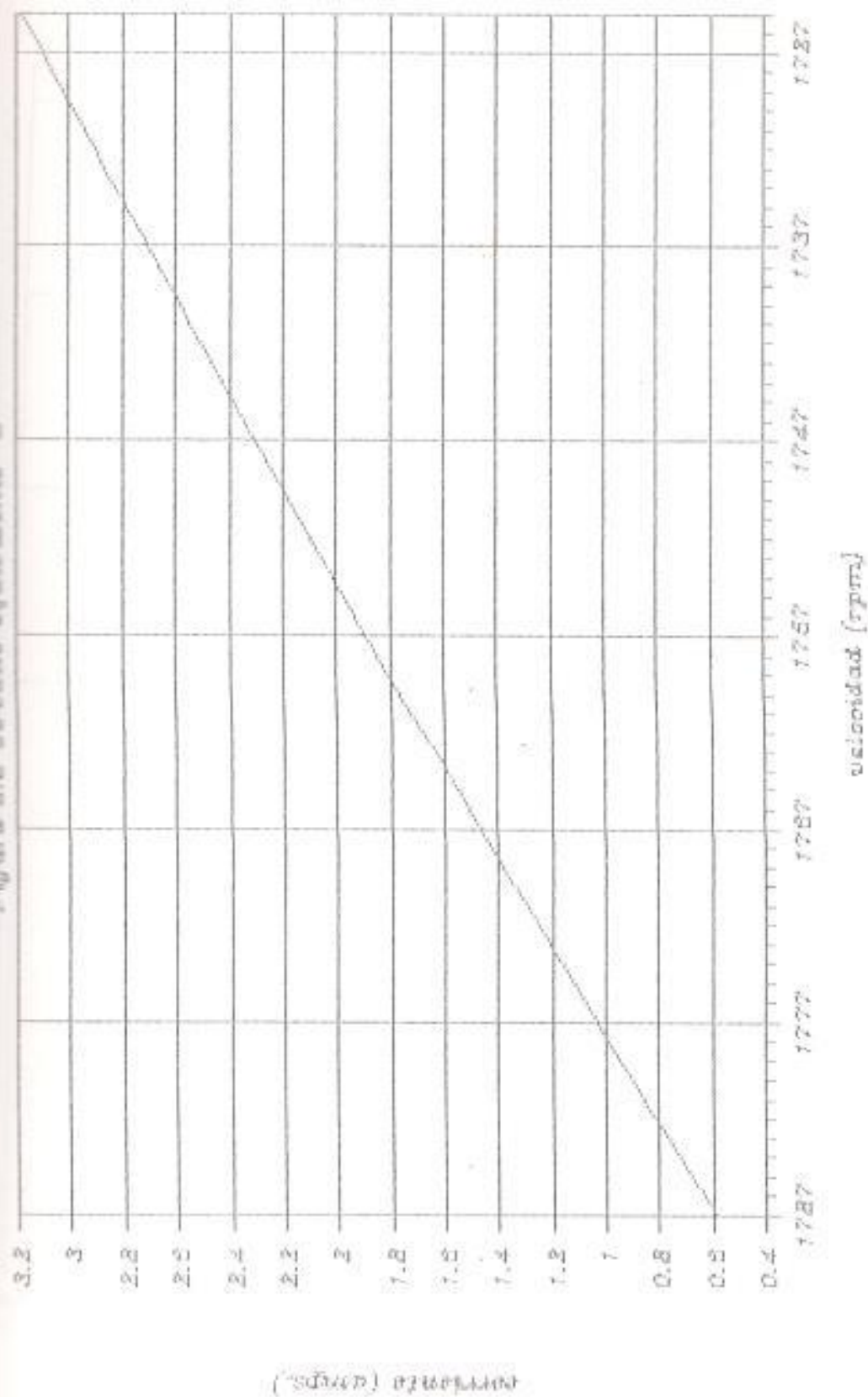
velocidad vs. corriente II

Figura 2.7 Circuito equivalente "Z"



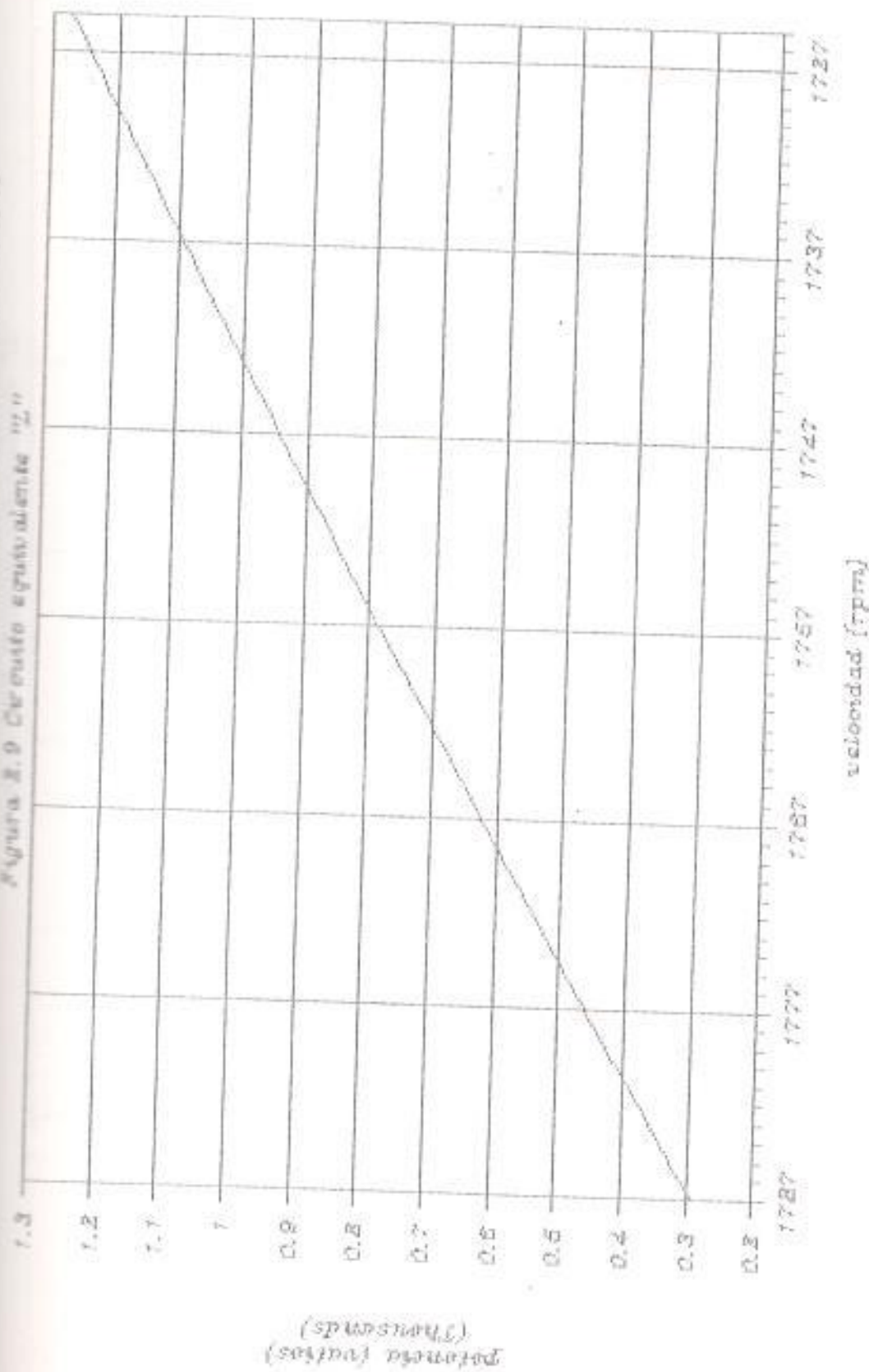
velocidad vs. corriente 12

Figura 2.8 Circuito equivalente "2"



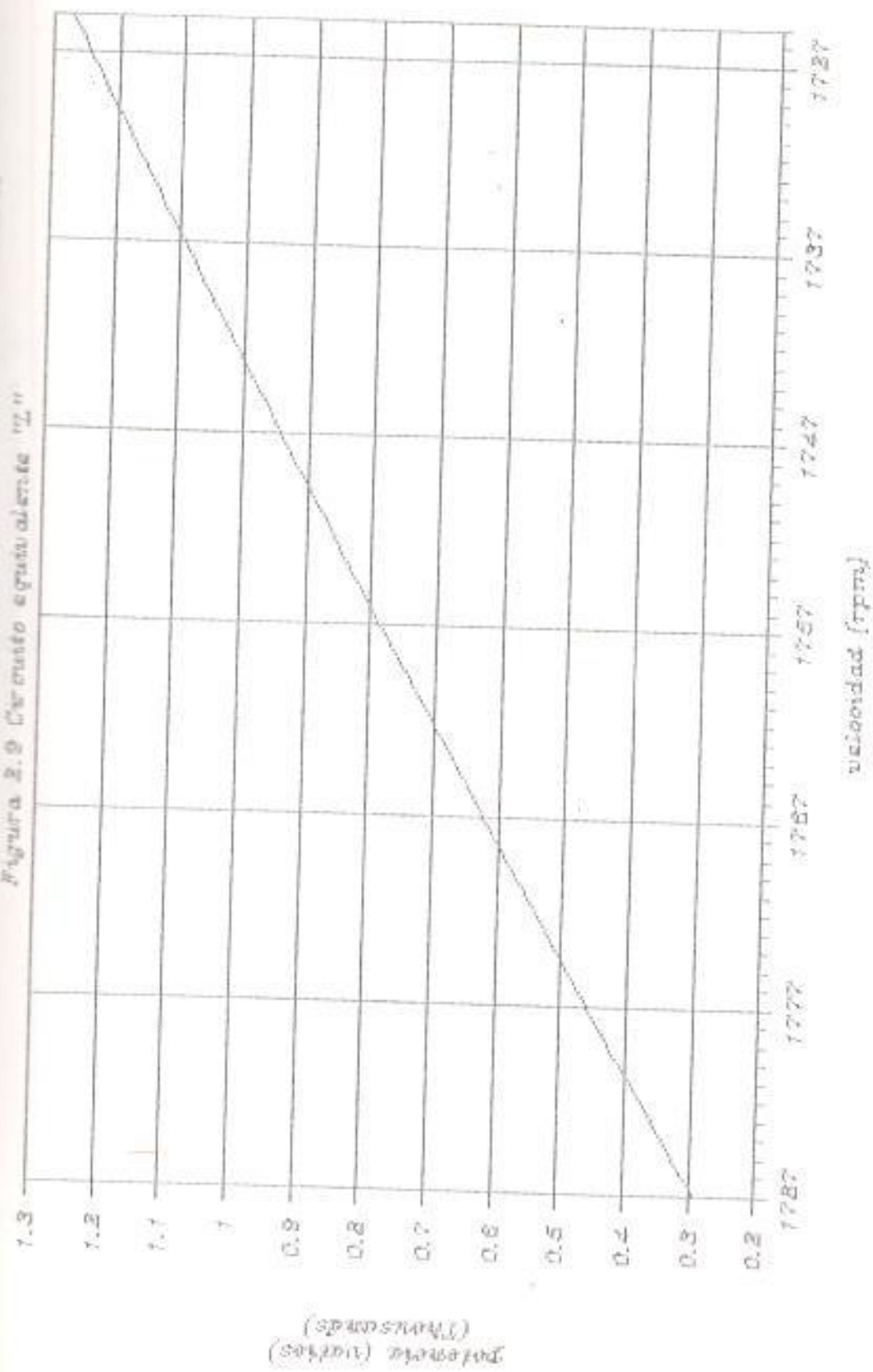
velocidad vs. potencia de entrada

Figura 2.9 Circuito equivalente "2"



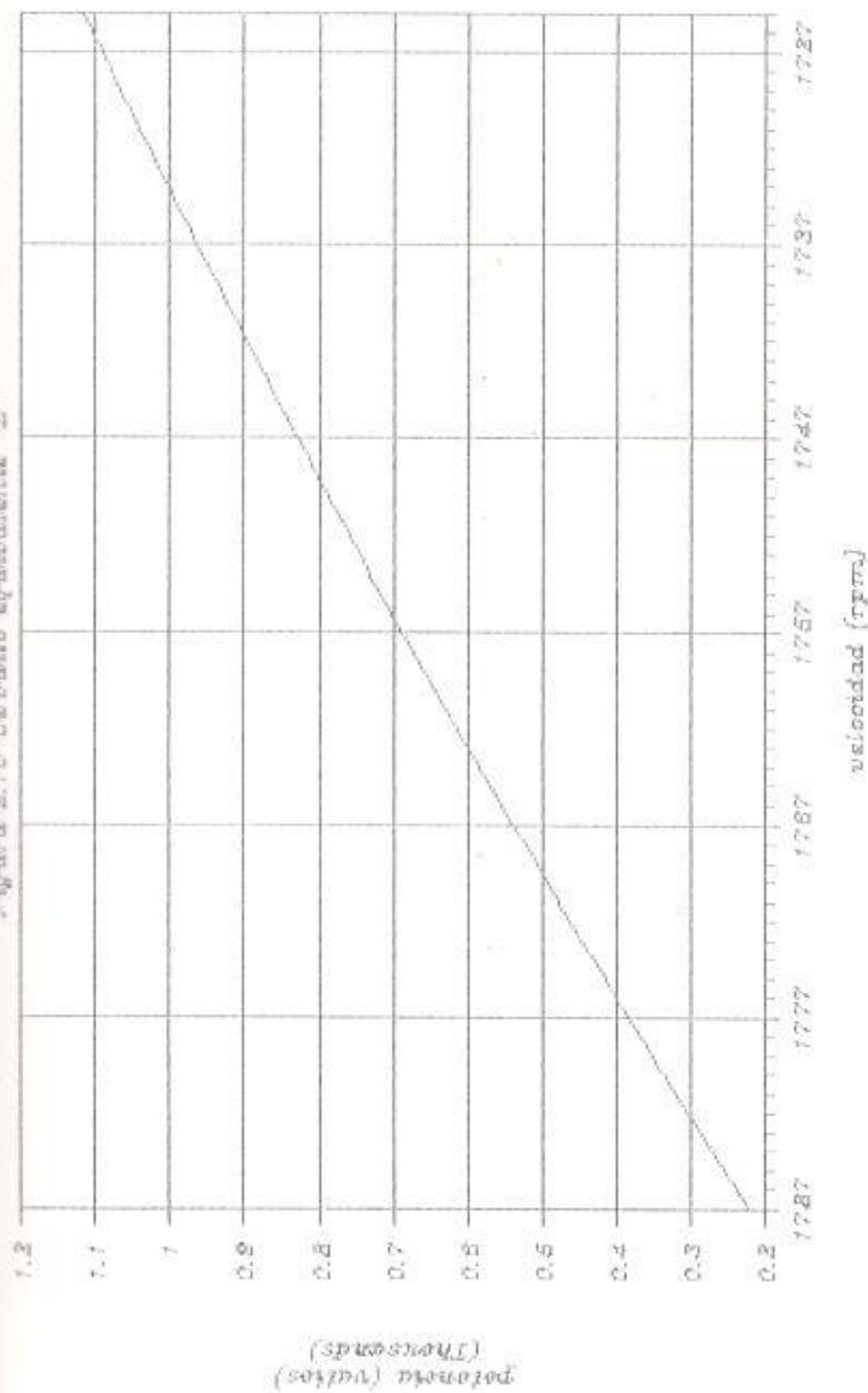
velocidad vs. potencia de entrada

Figura 2.9 Crecimiento exponencial "Z"



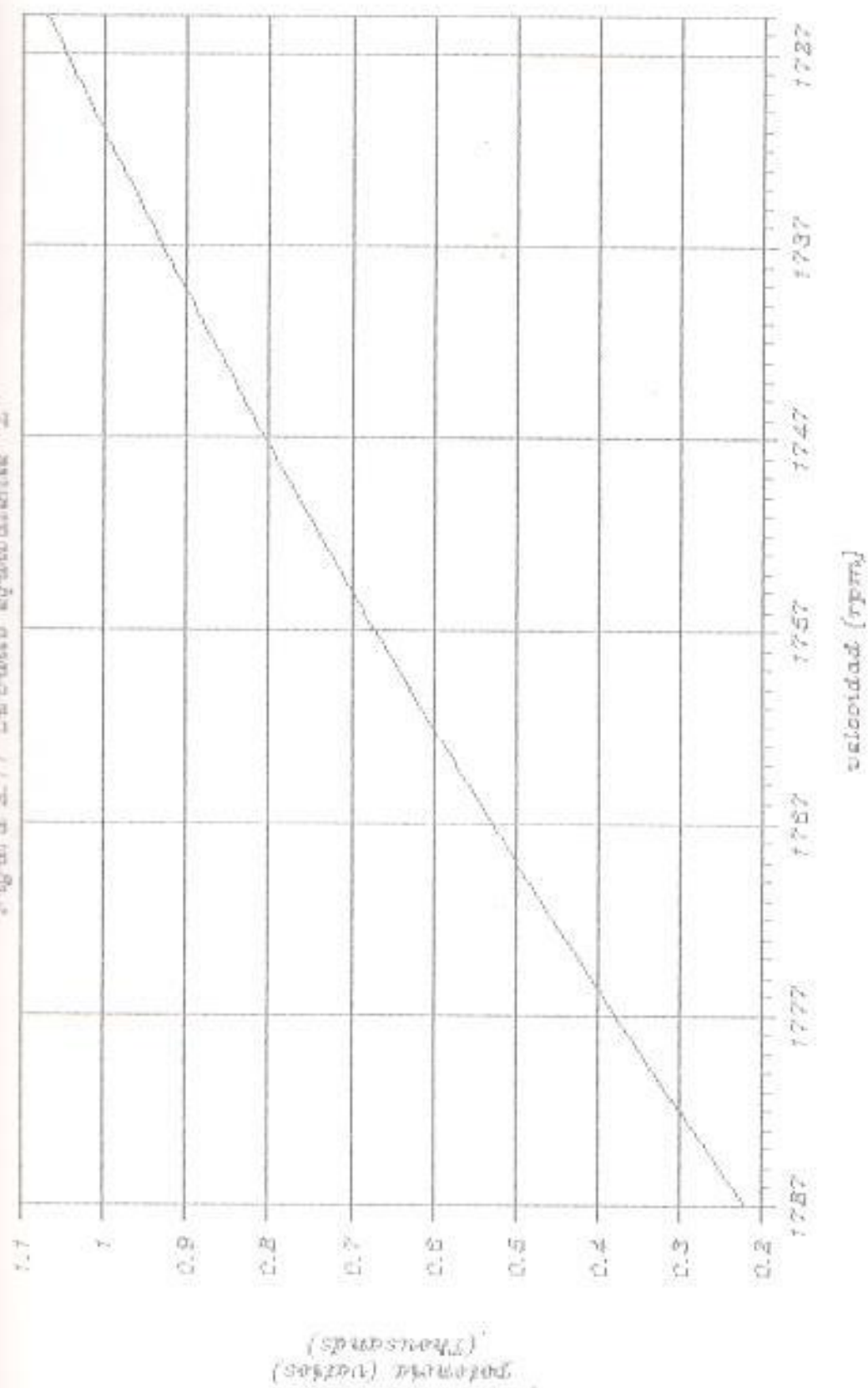
velocidad vs. potencia de giro

Figura 2.10 Circuito equivalente "2"



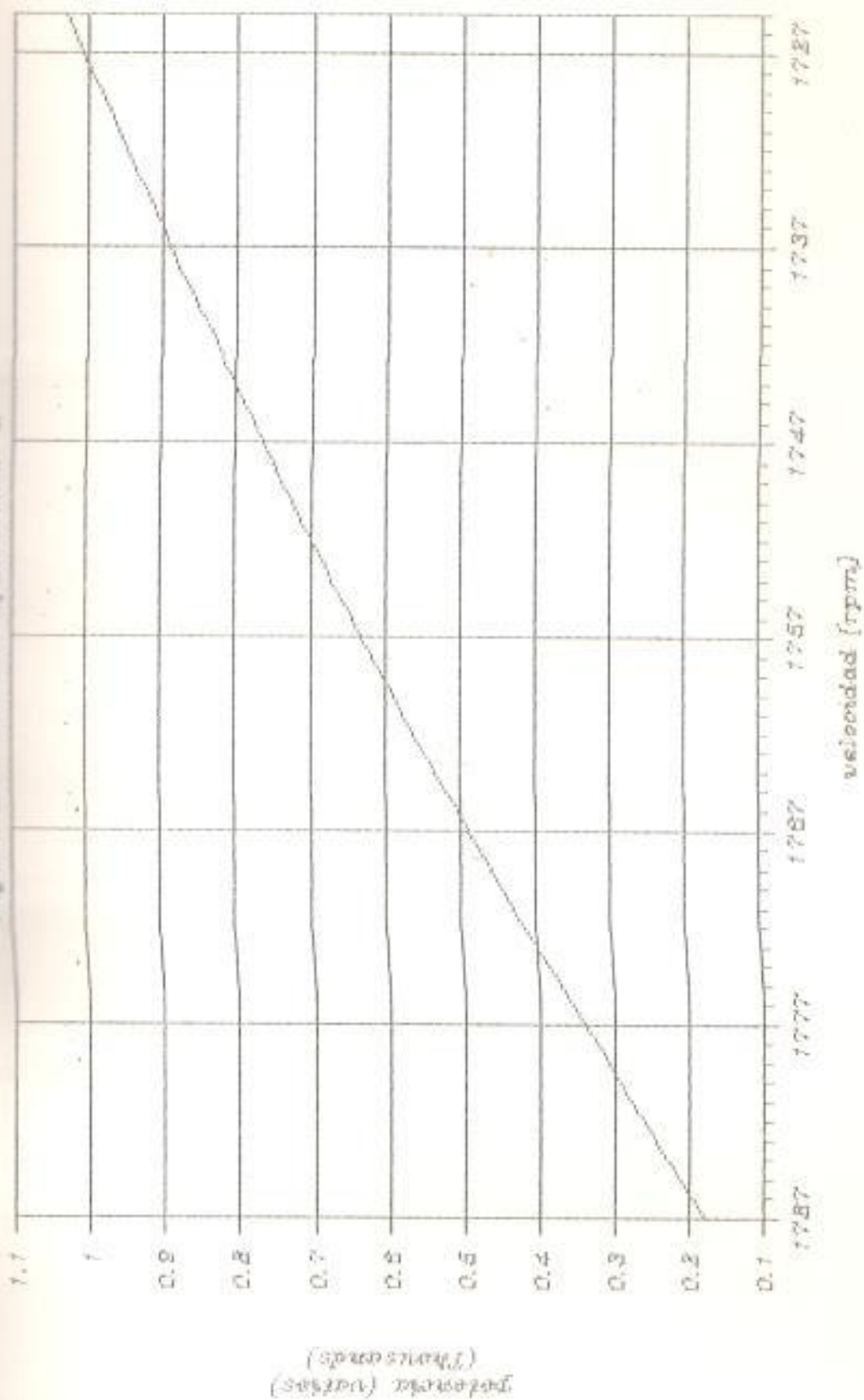
velocidad vs. potencia mec. dos.

Figura 2.11 Circuito equivalente "2"



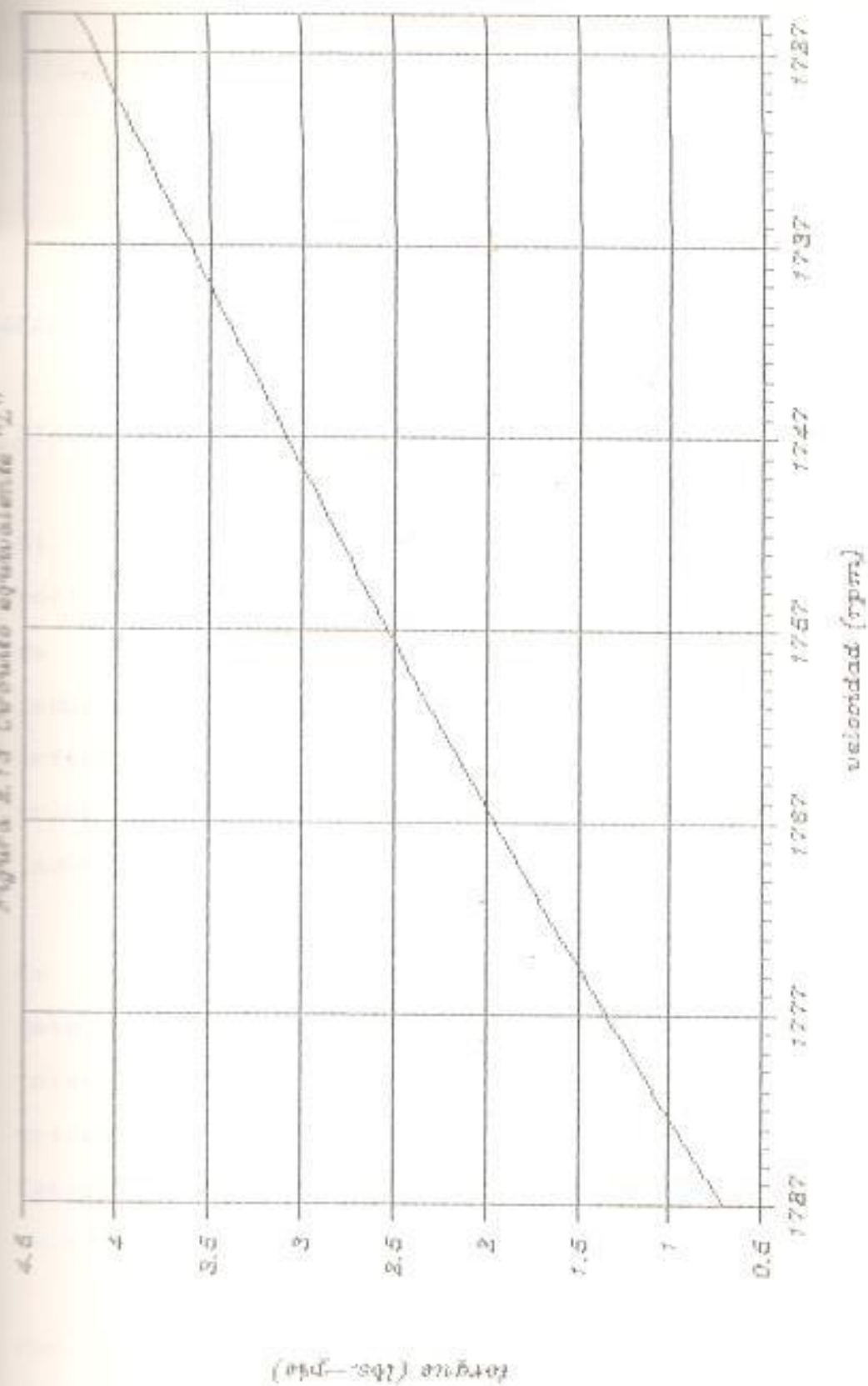
velocidad vs. potencia util

Figura 2.12 Circuito equivalente "L"



velocidad vs. torque util

Figura 2.13 Circuito equivalente "L"



CAPITULO III

DIAGRAMA DE CIRCULO

3.1 DIAGRAMA DE CIRCULO APROXIMADO

Al comparar el circuito equivalente del motor polifásico de inducción con el circuito equivalente de un transformador que alimenta una carga no inductiva se verá que es idéntico, de aquí se infiere que el diagrama circular aplicable para el transformador también lo será para el motor de inducción.

Es posible inclusive mediante este procedimiento detallar gráficamente en un solo diagrama las relaciones existentes entre fems, corrientes, entrada y salida de potencia, par motor, velocidad, factor de potencia y rendimiento con suficiente exactitud para la mayoría de los fines prácticos.

Por el hecho de utilizarse el circuito equivalente aproximado para la elaboración del diagrama de

representa la salida de potencia más las pérdidas en el cobre de los devanados del estator y rotor.

Como se dijo anteriormente el punto S es el de reposo y SM representa la entrada de potencia por fase, en ese estado, ésta se consume únicamente en las pérdidas en el cobre y en el núcleo, ya que no existen pérdidas debidas a las resistencias pasivas. A pesar de esto LM que es igual a GD se considera que representa las pérdidas en el núcleo, puesto que la ausencia de las pérdidas pasivas queda compensada por el aumento de las pérdidas en el núcleo en condiciones de reposo, de lo que se deduce que SL representa las pérdidas en el cobre en reposo.

De la figura 3.1 y por semejanza de triángulos tenemos que:

$$EG / SL = AG / AL = [AC \text{ SEN } (\theta_2)] / [AS \text{ SEN } (\theta_{2s})]$$

en el círculo

$$AC = AB \text{ SEN}(\theta_2) \text{ Y } AS = AB \text{ SEN}(\theta_{2s})$$

de donde

$$EG/SL = AC^2 / AS^2 = I_2^2 / I_{2cc}^2$$

$$= I_2^2 (R_1 + R_2) / I_{2cc}^2 (R_1 + R_2)$$

concluyéndose de lo anterior que si SL son las pérdidas de potencia en el cobre en reposo cuando la corriente es AS, EG es las pérdidas en el cobre cuando la corriente es AC.

Dividiendo la línea SL en dos partes proporcionales a R_2 y a R_1 utilizando cualquier método gráfico, nos dará el punto K, trazando la línea AK ésta cortará CD en el punto F, debe deducirse necesariamente que para cualquier corriente :

$$I_2 = AC$$

e $I_2^2 R_2$, o sea las pérdidas en el cobre del secundario estarán representadas por EF, mientras que las pérdidas en el cobre en el primario lo serán por FG.

La línea AS representa el lugar geométrico de todos los puntos tales como E que definen la potencia mecánica de salida por fase, por esta razón recibe el nombre de línea de potencia de salida. El par motor, es proporcional a la entrada de potencia en el secundario es decir, la potencia de salida más las pérdidas en el cobre del secundario y están

representadas por CF, el lugar geométrico de todos los puntos tales como F se encuentran en la línea AK, de aquí ésta recibe el nombre de línea del par motor.

Mediante construcciones geométricas adicionales y utilizando escalas adecuadas se determina el deslizamiento, el rendimiento y factor de potencia.

Para poder determinar gráficamente estos valores, de el punto A se levanta una perpendicular hasta el punto Q, el punto O' es la intersección de la prolongación de la línea AS y el eje horizontal de referencia, a partir del cual se levanta otra perpendicular hasta el punto Y definiendo de esta manera las líneas AQ y O'Y.

De el punto P de la línea de potencia de salida se traza PQ paralela a la línea del par motor, y PY paralela al eje de referencia; sobre éstas se miden los valores de deslizamiento y rendimiento respectivamente.

Al prolongar AC, corta en el punto R a QP, trazando O'C y prolongándola corta a PY en X. Estos dos puntos, R y X representan el porcentaje de deslizamiento y rendimiento, para las condiciones de

carga del punto C.

De la semejanza de los triángulos CFA y AQR

$$CF / FA = AQ / QR$$

Asi mismo de los triángulos EFA Y AQP

$$EF / FA = AQ / QP$$

Dividiendo ambas ecuaciones

$$EF / CF = QR / QP$$

El deslizamiento es proporcional a las pérdidas en el cobre del secundario divididas para el par motor; por lo tanto QR es la medida de deslizamiento que tiene a QP como unidad.

El rendimiento es la relación entre la potencia mecánica de salida y la de entrada, esto es :

$$CE / CD$$

De los triángulos semejantes EDO³ y O³YP

$$ED / O^3D = OY^3 / PY$$

De los triángulos $CD'O'$ y $O'YX$

$$CD / O'D = O'Y / XY$$

Dividiendo las dos ecuaciones anteriores

$$ED / CD = XY / PY$$

De donde

$$\text{Rendimiento} = XY / PY$$

El factor de potencia está determinado por el punto Z , que es la intersección de un círculo de radio conveniente con centro en O y la prolongación de la recta OC ; leído este valor en la proyección del punto Z sobre la escala vertical; todas estas construcciones se muestran en la figura 3.2.

3.1.1 Determinación del diagrama circular aproximado

El diagrama de círculo aproximado descrito en el artículo anterior se basa en hipótesis simplificadoras pero sirve para predecir con satisfactoria exactitud el comportamiento del motor de inducción. Los datos necesarios para su construcción, al igual que los ensayos

utilizados para los transformadores, se obtienen análogamente de dos pruebas realizadas en vacío.

A) Prueba a rotor libre.

En este ensayo aplicando al estator la tensión nominal a frecuencia nominal, la magnitud y fase de la corriente en el primario definirá el punto A. Estos valores serán respectivamente V_1, I_0 y P_0 , el ángulo de fase de la corriente se determinará por la relación:

$$\cos \theta_0 = P_0 / V_1 I_0$$

Este punto producto de las mediciones realizadas estará ligeramente arriba del vacío teórico puesto que será necesario un deslizamiento mínimo para desarrollar corriente en el rotor que produzca el par en vacío. Teóricamente sería necesario una máquina auxiliar que impulsara al motor a velocidad de sincronismo en el momento de las lecturas. Sin embargo se puede asumir que para fines prácticos resulta suficientemente exacto los valores medidos para determinar el

3.2 DIAGRAMA DE CIRCULO EXACTO

La utilización del circuito equivalente aproximado conduce fácilmente y por analogía, con el circuito del transformador, al diagrama circular de la corriente, es un hecho que también el circuito equivalente exacto, permite trazar un lugar geométrico circular para la corriente. Existen sin embargo, algunas limitaciones a la "exactitud" del mismo pero de todas maneras es una forma representativa más aproximada a la realidad física.

Los diferentes parámetros reactivos, tendrán variación en la práctica, dependiendo del rango de carga que se aplique, debido a la saturación del núcleo, de ésta manera las mediciones efectuadas en la determinación de los mismos, estarán sujetas a inexactitudes. Así mismo las resistencias efectivas serán mayores que la simple medición óhmica de las mismas debido a la distribución no uniforme de la corriente en la sección del conductor.

Ventajosamente la diferencia de las magnitudes "constantes" es de segundo orden y en otros casos es muy pequeña comparada con los valores de las restantes, que su efecto, queda enmascarado.

En resumen la conclusión es, que el límite entre la verdad absoluta y la de hechos observados es difusa pero esa inexactitud sirve para simplificar procedimientos; de tal manera que podemos resaltar el hecho, de que aún cuando el circuito "exacto" no lo sea riguramente en el sentido matemático, tiene un gran valor por los principios y procedimientos que involucra.

3.2.1 Deducción analítica del diagrama circular exacto

Del circuito equivalente, de la figura 3.3, la admitancia total leída entre los bornes ab sería:

$$(G^2 + B^2)^{1/2}$$

cuya parte resistiva es:

$$G/(G^2 + B^2) \text{ ohms}$$

y la reactiva

$$B/(G^2 + B^2) \text{ ohms}$$

En los bornes cd la impedancia total se reduce en $R_1 + jX_1$ continuando de la misma manera a

Si llamamos V_{cc} , I_{cc} y P_{cc} a la tensión, corriente y potencia de entrada respectivamente reducidas a valores por fase, de acuerdo al circuito aproximado tendremos que:

$$P_{cc} = I_{cc}^2 (R_1 + R_2)$$

pero como R_1 es determinable por medidas directas, podremos establecer el valor de R_2 .

También podrá deducirse el valor de $X_1 + X_2$, puesto que:

$$V_{cc} / I_{cc} = [(R_t)^2 + (X_1 + X_2)^2]^{1/2}$$

y

$$R_t = R_1 + R_2$$

son magnitudes conocidas, se determina la suma de las reactancias. Con este valor a su vez es posible calcular el diámetro del círculo que será:

$$V_1 / (X_1 + X_2)$$

través del circuito se tiene el siguiente cuadro que puesto en forma tabular es el siguiente:

TABLA 3.1

RESISTENCIA O CONDUCTANCIA	REACTANCIA O SUSCEPTANCIA
G	B
$[G/(G^2 + B^2)] - R_1 = q$	$[B/(G^2 + B^2)] - X_1 = r$
$[q/(q^2 + r^2)] - G_0 = 0$	$[r/(q^2 + r^2)] - B_0 = p$
$0/(0^2 + p^2) = R_2/S$	$p/(0^2 + p^2) = X_2$

A las variables N, P y M se le asigna los valores que a continuación se formulan:

$$N = R_1 X_2 Y_0^2 + R_1 B_0 + X_2 G_0$$

$$P = X_1 X_2 Y_0^2 + B_0 (X_1 + X_2) + 1/2$$

$$M = X_1 + X_2 [1 + (Z_1 Y_0)^2 + 2(R_1 G_0 + X_1 B_0)] + Z_1^2 B_0$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, por eliminación de o, p, q y r; dará como resultado:

$$(G - N / M)^2 + (B - P / M)^2 = (1 / 2 M)^2$$

Por la forma de esta ecuación, se deduce inmediatamente, que es un círculo, que representa el lugar geométrico de las variables G y B . Dicho círculo tendrá como radio $1/2 M$ y las coordenadas de su centro serán N/M y P/M , con esto se demuestra que el lugar geométrico de la admitancia equivalente es un círculo, al multiplicar por V_1 las variables G y B resulta los valores de corriente en fase y en cuadratura respectivamente, de lo cual se infiere que así mismo ésta tendrá un círculo como lugar geométrico.

3.2.1.1 Método de inversión

El método de demostración utilizado anteriormente requiere el manejo prolijo de seis ecuaciones y su resolución resulta engorrosa y prolongada, por lo que a continuación se expone otro método, que llega a la misma conclusión rápida y fácilmente basado en la ecuación de vectores:

$$V_1 = I_1 \{ R_1 + jX_1 + 1/IG_0 - jB_0 + 1/(R_2/s + jX_2) \}$$

la cual demuestra que referido al primario, la tensión aplicada por fase es igual a la corriente por fase multiplicada por una impedancia que es el término encerrado entre llaves. Esta misma ecuación se puede poner en la forma:

$$I_1 = V_1 / (R_1 + jX_1 + 1 / (G_0 - jB_0 + 1 / (R_2 / s + jX_2)))$$

En esta ecuación la expresión entre llaves representa, la admitancia equivalente total de la máquina, es decir que es igual a $G - jB$, multiplicada ésta por V_1 da la corriente en el primario I_1 en dos componentes, $V_1 G$ en fase con V_1 y $V_1 B$ en cuadratura con V_1 . De aquí, es que solamente se necesita demostrar que el lugar geométrico de la admitancia es un círculo cuando la variable "s" toma todos los valores posibles.

Para la realización de dicha

demostración es indispensable establecer claramente las siguientes proposiciones:

1. Si el lugar geométrico del punto terminal de un vector es una línea recta, el lugar geométrico del punto terminal de su recíproco es un círculo.
2. Si el lugar geométrico del punto terminal de un vector es un círculo que no pasa por el origen del vector, el lugar geométrico del punto terminal de su inverso es un círculo.

En la figura 3.4, la longitud $OL = Z_2$ representa la impedancia variable $R_2 / s + jX_2$, último subdenominador de la ecuación anterior. La recta $OK = X_2$ es la reactancia de dispersión del secundario y $KL = R_2 / s$ es la resistencia variable proporcional a la carga aplicada. El lugar geométrico del punto terminal de Z_2 es la línea AB , por lo tanto de acuerdo con la

proposición 1, la inversa de Z_2 está representada por la cuerda OP de un círculo que tiene su centro C en una línea que pasa por O y es perpendicular a AB. Si se elige el radio del círculo de tal manera que OM sea igual a la unidad, tanto a la escala de ohmios como de mhos, entonces:

$$OP = 1 / Z_2$$

De acuerdo a la ecuación $G_o - jB_o$ debe sumarse geoméricamente a $1 / Z_2$, esto se efectúa separando G_o a la izquierda del origen O y B_o verticalmente hacia arriba del punto O', con lo que la longitud O'P representará en magnitud y posición a:

$$G_o - jB_o + 1 / Z_2$$

En el punto P' la línea O'P corta el círculo C, por lo tanto O'P' es proporcional a la inversa de O'P. Pero como geoméricamente:

$$(O'P)(O'P') = (O'T)^2 \Leftrightarrow 1$$

en esta expresión como $O'T$ es la tangente trazada desde O' al círculo C , se deduce que $O'P'$ no es igual a la inversa $O'P$ a la escala de ohmios que se determinó cuando se hizo $OM = 1$. Es necesario entonces construir un nuevo círculo con centro en C' sobre la línea $O'C$, de tal manera que exista la relación $1 / (O'T)^2$ con respecto al círculo C .

En la figura 3.5, las longitudes trazadas desde O' hasta el círculo C' representan a escala la impedancia $1 / (G_o - jB_o + 1 / Z_2)$, pero así mismo de acuerdo a la ecuación hay que sumarle la impedancia de dispersión del primario $R_1 + jX_1$, lo que se logra gráficamente desplazando el origen desde O' hasta O'' . Si $O''Q$ es igual a $R_1 + jX_1 + 1 / (G_o - jB_o + 1 / Z_2)$; su inversa será proporcional a $O''Q'$.

El producto $O''Q'$ por $O''Q$ es $(O''T'')^2$, debiendo ser igual a la

unidad si se mostrase a escala primitiva. Para lograr esto se construye un nuevo círculo C'' con la característica indicada. Finalmente la admitancia en su conjunto correspondiente a un valor arbitrario de Z_2 es $O''Q''$ en la figura 3.5.

De aquí es evidente que el lugar geométrico de la corriente del primario es un círculo.

3.3 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA

De las figuras 3.1 y 3.2, conforme se desplaza el punto C en sentido dextrógiro, el valor de la potencia de salida varía desde cero en el punto A hasta un valor máximo y luego tiene el valor cero en el punto S. Para cada valor que tome la potencia de salida entre estos dos puntos, existirán dos valores de las variables dependientes, éstas son, la corriente en el primario y en el secundario, factor de potencia, par motor, deslizamiento y rendimiento. Trazando los respectivos diagramas utilizando la potencia de salida como abscisa y las variables como ordenadas se obtiene la figura 3.6. La región de las curvas que se encuentran más allá del valor máximo

de potencia de salida, señalan una región de inestabilidad y el único procedimiento para poder tomar lecturas consiste en conectar mecánicamente el motor de inducción a un motor de velocidad variable, el cual mantendrá la velocidad en los valores deseados.

El rango normal de trabajo del motor es decir, entre vacío y carga nominal está incluido dentro del punto de potencia máxima de salida, gráficamente representa un arco pequeño próximo al punto A. Cuando la carga aplicada al motor iguala a la potencia máxima o es mayor, el motor se detendría al alcanzar el punto crítico pero en la práctica esto no debería suceder puesto que la protección respectiva del motor cortaría la alimentación eléctrica del mismo, antes de alcanzar dicho punto, evitando recalentamientos excesivos.

El punto C_p de potencia máxima de salida se encuentra en la intersección del radio del círculo perpendicular a la línea de potencia de salida, así mismo el par motor máximo corresponde a la intersección del radio perpendicular a la línea del par motor con el círculo es decir el punto C_t . La potencia máxima se consigue con un deslizamiento ligeramente inferior al del par máximo, es decir a

medida que la carga aplicada va aumentando, primero llegamos al punto C_p y luego al C_t .

De la figura 3.7, es evidente que el factor de potencia máximo se obtendrá cuando OC sea tangente al círculo, esto es que θ_1 tenga un valor mínimo θ_{1m} . Para esta condición $AX = AY$, de donde:

$$I_o \sin(\theta_o - \theta_{1m}) = V_1 [1 - \cos(\theta_{1m})] / [2(X_1 + X_2)]$$

Con lo que se determina el factor de potencia máximo en función de magnitudes conocidas. Si θ_o está próximo a 90° grados es posible reducir la ecuación anterior a:

Máximo Factor de Potencia =

$$[0,5 V_1 / (X_1 + X_2)] / [I_o + 0,5 V_1 / (X_1 + X_2)]$$

el significado geométrico de esta expresión se lo presenta en la figura 3.8.

El valor de la corriente está expresado en amperios, y esta escala se corresponde con el diámetro del círculo AB, que es igual a $V_1 / (X_1 + X_2)$. De aquí es que se puede fácilmente convertir las magnitudes correspondientes a potencia en vatios simplemente

multiplicando el número de la escala en amperios por $n_1 V_1$, tal es el caso de CE y CF .

En motores de alto rendimiento, o sea aquellos en que la resistencia total es muy pequeña, la corriente de arranque se aproxima al diámetro del círculo y el par crítico se aproxima al radio del círculo. Por esta razón se deduce que el par máximo por unidad será menor que la mitad de la corriente de arranque por unidad y la potencia máxima de salida será menor que la mitad de los voltamperios de arranque.

La American Standard Association, ha fijado para los motores de inducción un par crítico no inferior al 200% del par con carga nominal. Para una variación de la tensión de -10%, se experimentaría una reducción del par crítico a $200 \times 0,90^2 = 162\%$, por esta razón se hacen los proyectos para un par crítico que se aproxima al 250% del par con carga nominal. La ASA así mismo prescribe que la corriente de arranque para motores trifásicos mayores de 15 HP y 220 voltios de tensión nominal, no exceda de 14,5 amperios por HP. La corriente nominal por HP es:

$$746 / (1,732 \times 220 \times 0,8) = 2,45 \text{ amp}$$

la corriente de arranque sería $14,5 / 2,45 = 6,0$ veces la nominal de plena carga. El par de arranque esto es para $s = 1$, se calcularía de la ecuación:

$$T = (7,04 \times m_1 \times I_2^2 \times R_2) / (n_1 s)$$

si se conoce la resistencia del secundario.

CAPITULO IV

PRUEBAS EN MAQUINAS DE INDUCCION

4.1 DETERMINACION DE RESISTENCIAS

Previa a la realización de las pruebas (vacío, rotor bloqueado, carga) el primer paso es la determinación de los valores de la resistencia del estator, la cual se realiza utilizando el método de corriente continua, con la utilización del puente de Wheatstone para mayor precisión. En la figura 4.1 se muestra el esquema de conexiones utilizado; del circuito establecido en la misma deducimos:

$$R_{dc} = 0,5 \times V / I$$

Donde V es el voltaje directo aplicado e I la corriente continua medida.

La determinación del valor de la resistencia rotórica se puede efectuar por el mismo método, pero es preferible calcular dicho valor referido al estator utilizando los resultados obtenidos de la

prueba a rotor bloqueado, debido a los errores que podrían introducirse cuando se utiliza la relación de transformación.

Debido al efecto "piel" el valor de la resistencia se incrementa hasta un valor mayor conocido como "resistencia efectiva". Basados en la experiencia, se ha establecido que el factor que relaciona la resistencia efectiva con la resistencia D.C., para motores de pequeña capacidad es de 1,1 y para los de gran capacidad el factor es aproximadamente 1,3. En el presente estudio el motor es de 1,5 HP por lo que se selecciona el valor 1,1, por lo tanto:

$$R_1 = 1,1 \times R_{dc}$$

La variación de temperatura afecta los valores de resistencia de acuerdo a la fórmula:

$$R_{t2} = R_{t1} (234,5 + t_2) / (234,5 + t_1)$$

Puesto que hay un incremento de temperatura durante la operación del motor, es necesario conocer los valores de la resistencia a dichas temperaturas, lo cual se realiza utilizando la fórmula anterior. En la tabla 4.1 presentamos los valores de la resistencia del devanado estático, medida D.C.,

efectiva a 25°C grados y efectiva en operación a 75°C grados.

TABLA 4.1

VALORES DE RESISTENCIA DEL DEVANADO DEL ESTATOR

MEDIDA D.C.	EFFECTIVA	EFFECTIVA
A 25°C	A 25°C	A 75°C
2,236	2,460	2,934
OHMS	OHMS	OHMS

4.2 PRUEBA EN VACIO

Con la realización de esta prueba y la de vacío ideal se podrá determinar:

Los parámetros de excitación.

Las pérdidas en vacío .

Las pérdidas mecánicas.

Considerando el circuito equivalente del motor de la figura 4.2, en la presente prueba queda reducido, al diagrama de la figura 4.3, puesto que, como su nombre lo indica la máquina debe funcionar sin carga y en esas condiciones la resistencia variable que representa la carga sería cero suprimiéndose el

ramal del secundario, pues estaría a circuito abierto.

De acuerdo a los valores especificados en la placa, y realizadas las conexiones de acuerdo a la figura 4.4 se alimenta al motor con la tensión nominal a la frecuencia nominal y se toma las lecturas de la tensión entre líneas V_o , la corriente primaria I_o y la potencia de entrada P_o .

Como no existe potencia de salida, toda la potencia de entrada será consumida en el cobre del estator P_{cu} , en el núcleo $P_{(h+f)}$, pérdidas por fricción y ventilación del rotor $P_{(f+v)}$, y en el hierro debidas a la rotación y abertura de las ranuras $P_{(fe+rot)}$, considerándose estas dos últimas como pérdidas mecánicas (P_{mec}). De aquí se tiene que:

$$P_o = P_{cu} + P_{(h+f)} + P_{(f+v)} + P_{(fe+rot)}$$

Reemplazando:

$$P_{mec} = P_{(f+v)} + P_{(fe+rot)}$$

dará

$$P_o = P_{cu} + P_{(h+f)} + P_{mec}$$

luego

$$P_{(h+f)} + P_{mec} = P_0 - 3I^2R_1$$

El valor utilizado de R_1 corresponde al de la resistencia efectiva, considerando la temperatura de los devanados en el momento de la prueba.

Para establecer los parámetros de excitación es necesario entonces conocer los valores de P_{mec} , para lo cual se realiza una prueba adicional denominada "prueba de vacío ideal", que consiste en acoplar mecánicamente el rotor de la máquina a otro motor capaz de llevarlo a la velocidad sincrónica. En estas condiciones la corriente del rotor sería teórica y prácticamente cero siendo suministrada la P_{mec} , por la máquina auxiliar.

El procedimiento para efectuar esta prueba es el siguiente; una vez realizado el acoplamiento mecánico de la máquina auxiliar se la hace revolucionar hasta la velocidad sincrónica, entonces se aplica el voltaje trifásico nominal teniendo cuidado que el sentido de giro del motor sea el mismo que el de la máquina auxiliar. En el caso de experimentarse alguna variación de velocidad ésta debe corregirse a la de sincronismo. Se toma las

lecturas de tensión V_{oi} , la corriente primaria I_{oi} y la potencia de entrada P_{oi} .

Como la P_{mec} es suministrada por la máquina auxiliar entonces:

$$P_{oi} = P_{cu} + P_{(h+f)}$$

$$P_{(h+f)} = P_{oi} - P_{cu} = P_{oi} - 3I_{oi}^2 R_1$$

Aproximadamente también

$$P_{mec} = P_o - P_{oi}$$

del circuito equivalente mostrado en la figura 4.3

$$E_{11} = (V_{oi} / 1,73)(R_1 + jX_1)$$

El valor de X_1 se lo obtiene de la prueba a rotor bloqueado. De la fórmula anterior, se calcula E_{11} y conociendo $P_{(h+f)}$ se determina G_o .

$$G_o = P_{(h+f)} / 3 \times E_{oi}^2$$

y también la admitancia de magnetización

$$|Y_o| = I_{oi} / E_{11} = |G_o - jB_o|$$

La susceptancia será:

$$B_o = (Y_o^2 - G_o^2)^{1/2}$$

Si se representa el ramal de excitación como una impedancia serie entonces:

$$Z_o = R_o + jX_o$$

$$R_o = G_o / (G_o^2 + B_o^2)$$

$$X_o = B_o / (G_o^2 + B_o^2)$$

A continuación se presentan en las tablas 4.2 y 4.3 los resultados de los valores obtenidos en las mediciones de las pruebas de vacío y vacío ideal a la temperatura indicada.

TABLA 4.2

MEDICIONES DE LA PRUEBA EN VACÍO

TENSION	CORRIENTE	POTENCIA	VELOCIDAD	TEMPERATURA
V_o	I_o	P_o	N_o	T
220	3,2	180	1792	25
VOLTS	AMPS	WATTS	RPM	$^{\circ}C$

TABLA 4.3

MEDICIONES DE LA PRUEBA EN VACIO IDEAL

TENSION	CORRIENTE	POTENCIA	VELOCIDAD	TEMPERATURA
V_{oi}	I_{oi}	P_{oi}	N_s	T
220	3,15	140	1800	25
VOLTS	AMPS	WATTS	RPM	$^{\circ}C$

Cabe anotar que teóricamente la corriente de magnetización debe estar en el orden del 18% al 40% de la corriente nominal del motor, sin embargo se ha obtenido valores en ambas pruebas casi al 75% de la corriente nominal. La causa es que el motor Katto utilizado posee un entrehierro demasiado grande y por lo tanto la reluctancia será mayor que la normal, necesitándose entonces una mayor f.m.m. para obtener el flujo normal y en consecuencia la corriente magnetizante debe incrementarse para compensar las pérdidas en el entrehierro.

4.3 PRUEBA A RÓTOR BLOQUEADO

La prueba a rotor bloqueado permite determinar los valores de los siguientes parámetros:

La reactancia de dispersión del estator X_1 .

La reactancia de dispersión del rotor referida al estator X_2 .

La resistencia del rotor referida al estator R_2 .

La figura 4.5 muestra el esquema de conexiones a ser utilizado para la realización de esta prueba. En esta prueba el deslizamiento tiene el valor máximo de uno, porque el rotor está estacionario y R_2/s toma así mismo su valor máximo de R_2 ; también la impedancia secundaria $R_2 + jX_2$ toma entonces un valor mucho menor que la magnetizante $R_o + jX_o$, luego la caída de tensión en el primario será grande y la corriente de magnetización será prácticamente despreciable, por lo que puede omitirse el ramal de excitación, en estas condiciones el circuito equivalente se convierte en el de la figura 4.6.

En primer lugar es necesario bloquear el rotor mediante la aplicación de un freno que evite que éste gire. A continuación se aplica al motor una tensión reducida que se la ajusta hasta que produzca en el primario una corriente igual a la nominal del motor. Entonces se procede a tomar las lecturas de tensión de alimentación V_{CC} , corriente nominal I_{CC} , y la potencia de entrada P_{CC} .

En reposo, la potencia mecánica desarrollada y las pérdidas mecánicas son cero, luego P_{cc} se consume en el cobre del estator y rotor o sea:

$$P_{cc} = P_{cu1} + P_{cu2}$$

Del circuito equivalente a rotor bloqueado figura 4.6.

$$R = R_1 + R_2$$

$$X = X_1 + X_2$$

$$Z = R + X$$

Con los valores de las mediciones se calcula:

$$R = P_{cc} / (3 \times I_{cc}^2)$$

Por lo tanto:

$$R_2 = R - R_1$$

también

$$Z = V_{cc} / (1,73 \times I_{cc})$$

$$X = (Z^2 - R^2)^{1/2}$$

Para encontrar los valores de X_1 y X_2 conociendo su suma, tendremos que referirnos a la tabla 4.4, tomada de una publicación de IEEE titulada "Código de pruebas para motores polifásicos de inducción y generadores", en que lista la relación de valores de X_1 , X_2 y X de acuerdo a la clasificación del motor. Cuando se desconoce la clasificación del motor aconseja utilizar la relación:

$$X_1 = X_2 = 0,5 \times X$$

A continuación se presenta en forma tabular los resultados de las mediciones de esta prueba, Tabla No. 4.5 y la No. 4.6 con las proporciones empíricas de las reactancias.

TABLA 4.5

MEDICIONES DE LA PRUEBA A ROTOR BLOQUEADO

TENSION	CORRIENTE	POTENCIA	VELOCIDAD	TEMPERATURA
Vcc	Icc	Pcc	N	T
40,9	4,2	205	0	25
VOLTS	AMPS	WTS	RPM	°C

TABLA 4.4

RELACION DE REACTANCIAS EN MOTORES DE INDUCCION

CLASE	DESCRIPCION	X_1/X_{eq}	X_{2e}/X_{eq}
A	Par y corriente de arranque normal.	0,5	0,5
B	Par de arranque normal, corriente baja.	0,4	0,6
C	Par de arranque alto, corriente baja.	0,3	0,7
D	Deslizamiento elevado, resistencia elevada.	0,5	0,5
Rotor Devanado		0,5	0,5
Clase Desconocida		0,5	0,5

TABLA 4.6

VALORES CALCULADOS DE LOS PARAMETROS A PARTIR DE LAS PRUEBAS EN VACIO Y A ROTOR BLOQUEADO

R_1	X_1	G_m	B_m	R_{2e}	X_{2e}	$P_{(h+f)}$	P_{mec}
2,46	2,03	15,47	262,17	1,41	2,03	66,77	40
OHMS	OHMS	MHOS	MHOS	OHMS	OHMS	WATTS	WATTS

4.4 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS

A partir de los circuitos equivalentes de las pruebas anteriores se obtienen los valores de los parámetros, en condiciones de arranque y operación para lo cual es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. En la puesta en marcha del motor.

a. La temperatura es de 25°C , salvo que el motor haya estado en operación anteriormente. Por lo tanto:

$$R_1 = 2,46$$

$$R_2 = 1,41$$

b. Puesto que la frecuencia en el momento del arranque es la misma en el rotor que la del estator, R_2 tendrá el valor obtenido en la prueba a rotor bloqueado mostrado en el literal anterior.

c. Cuando los deslizamientos son grandes así como también en el arranque, las corrientes tienen valores elevados y saturan el hierro que a su vez

forma parte de la trayectoria del flujo de dispersión; por éste motivo las reactancias X_1 y X_2 son menores en dicho momento que en operación.

La prueba a rotor bloqueado se la realiza a tensión reducida por lo que el efecto de saturación no es notorio, pero de las mediciones efectuadas se determina la corriente de rotor bloqueado a tensión nominal mediante la siguiente proporción:

$$I_{cc} = I_{nom} (V_{nom} / V_{cc})$$

$$I_{cc} = 4,2 (220 / 40,9) = 22,59$$

Este valor de la corriente debe ser menor que el real puesto que no considera la disminución del valor de las reactancias por la saturación, por lo tanto para el cálculo de la corriente de arranque debemos utilizar los valores de las reactancias de dispersión saturadas. Para esto utilizamos el oscilograma de la corriente de arranque a tensión nominal. Realizando los cálculos correspondientes:

$$X_1 = 1,96$$

$$X_2 = 1,96$$

De aquí también se establece el factor de saturación:

$$F.S. = 2,034 / 1,96 = 1,035$$

d. La reactancia de magnetización en forma similar a las reactancias de dispersión debido a la saturación sufre una ligera disminución durante el arranque, pero permanece prácticamente constante entre vacío y sobrecarga. A pesar de esto sigue siendo mucho mayor que la impedancia del rotor a deslizamientos elevados por lo que la ligera disminución de X_D supone efectos prácticamente despreciables en el motor y consecuentemente se la considera constante a cualquier deslizamiento, luego:

$$B_D = 262,17 \times 10^{(-4)} \text{ mhos}$$

también

$$G_D = 15,47 \times 10^{(-4)} \text{ mhos}$$

El diagrama en la figura 4.7 muestra el circuito equivalente del motor durante el arranque y la

tabla No 4.7 presenta los seis parámetros del mismo.

2. Durante la operación .

a. La temperatura de régimen será 75°C y por lo tanto de acuerdo a la fórmula:

$$R_1 = 2,93 \text{ ohms}$$

$$R_2 = 1,68 \text{ ohms}$$

b. En régimen de operación es decir entre vacío y sobrecarga prácticamente no existe saturación del hierro en la trayectoria del flujo de dispersión, por lo tanto en este caso o sea con deslizamientos pequeños para efecto de los cálculos se debe utilizar los valores de las reactancias no saturadas obtenidas de las pruebas a rotor bloqueado:

$$X_1 = 2,03$$

$$X_2 = 2,03$$

c. La frecuencia de las corrientes del rotor durante la operación tendrá valores pequeños, como

consecuencia de esto se debe corregir los valores de R_2 y de X_2 ya que en la prueba a rotor bloqueado la frecuencia del secundario es 60 Hz. Asumiendo un factor pelicular de 1,1:

$$R_2 = 1,68 / 1,1 = 1,532 \text{ ohms}$$

para la reactancia de dispersión, con un factor pelicular de 0,97 se tendrá:

$$X_2 = 2,03 / 0,97 = 2,10 \text{ mhos}$$

- d. Los valores de la admitancia de magnetización permanecerán constantes durante la operación puesto que la saturación de la trayectoria en el hierro del flujo principal es mínima y ocasionaría sólo variaciones despreciables, por tanto:

$$B_o = 262,17 \times 10^{(-4)} \text{ mhos}$$

$$G_o = 15,47 \times 10^{(-4)} \text{ mhos}$$

La tabla 4.8 muestra los valores establecidos de los parámetros durante la operación del motor.

TABLA 4.7

VALORES DE LOS PARAMETROS DURANTE EL ARRANQUE

R_1	X_1	G_o	B_o	R_2	X_2	T
2,46	1,96	15,47	262,17	1,41	1,96	25
OHMS	OHMS	MHOS	MHOS	OHMS	OHMS	$^{\circ}C$

TABLA 4.8

VALORES DE LOS PARAMETROS DURANTE OPERACION

R_1	X_1	G_o	B_o	R_2	X_2	T
2,93	2,03	15,47	262,17	1,53	2,10	75
OHMS	OHMS	MHOS	MHOS	OHMS	OHMS	$^{\circ}C$

4.5 PRUEBA DE CARGA

Para la determinación experimental del comportamiento del motor de inducción se realizarán las conexiones mostradas en la figura 4.9, aplicándole al motor un voltaje trifásico balanceado. El freno que se aplicará al eje del motor, para simular la carga es un dinamómetro que se lo acciona como generador de excitación separada.

El voltaje del generador de excitación separada se lo mantendrá constante en 75 voltios, para cada uno de los valores de carga. En estas condiciones se toman las lecturas de los vatímetros, la intensidad de corriente en el primario y la velocidad N en rpm, el voltaje de entrada es un valor constante. Para cada valor de par motor aplicado al freno se toman las lecturas en los diferentes instrumentos, lo que permite en forma directa obtener los valores de velocidad, corriente de entrada, potencia de entrada, torque útil, factor de potencia, rendimiento y el deslizamiento. Así mismo se calcula otros parámetros de interés utilizando las siguientes relaciones:

$$P_{\text{útil}} = N \times T_{\text{útil}} / 7.04$$

$$P_{\text{Js}} = 3 \times I_1^2 \times R_1 \quad (R_1 = 2.934)$$

$$P_{\text{Jr}} = s \times P_{\text{cgir}} / 100$$

$$P_{\text{cgir}} = P_e - (P_{\text{Js}} + P_{\text{h+f}}) \quad (P_{\text{h+f}} = 66.77)$$

$$P_{\text{mecdes}} = (1 - s / 100) P_{\text{cgir}}$$

$$F.P. = P_e / (3^{1/2} V_1 I_1)$$

$$\eta\% = P_{\text{útil}} \times 100 / P_e$$

$$s\% = (N_s - N) \times 100 / N_s$$

De las lecturas obtenidas y utilizando las fórmulas anteriores se elabora la tabla 4.9 en la que se listan los valores característicos del motor operando en condiciones normales. Para efecto de visualizar el comportamiento de la máquina se grafican las curvas características; en las figuras 4.10 a 4.18.

De la curva eficiencia vs. velocidad se puede observar que la mayor eficiencia se obtiene para la corriente nominal (4.2 amp); en estas condiciones el motor entrega en el eje una potencia útil de 865 wts. que es la salida nominal. Con esta consideración se puede establecer los parámetros principales del motor de los datos experimentales:

$$P_{\text{útil}} = 865 \text{ Wts.}$$

$$N = 1731 \text{ RPM}$$

$$I = 4.2 \text{ AMP}$$

$$T_{\text{útil}} = 3.51 \text{ Lb-Pie}$$

$$P_e = 1160 \text{ Wtts.}$$

$$P_{js} = 150 \text{ Wtts}$$

$$P_{jr} = 37.5 \text{ Wtts.}$$

$$\text{Eff. \%} = 74.57$$

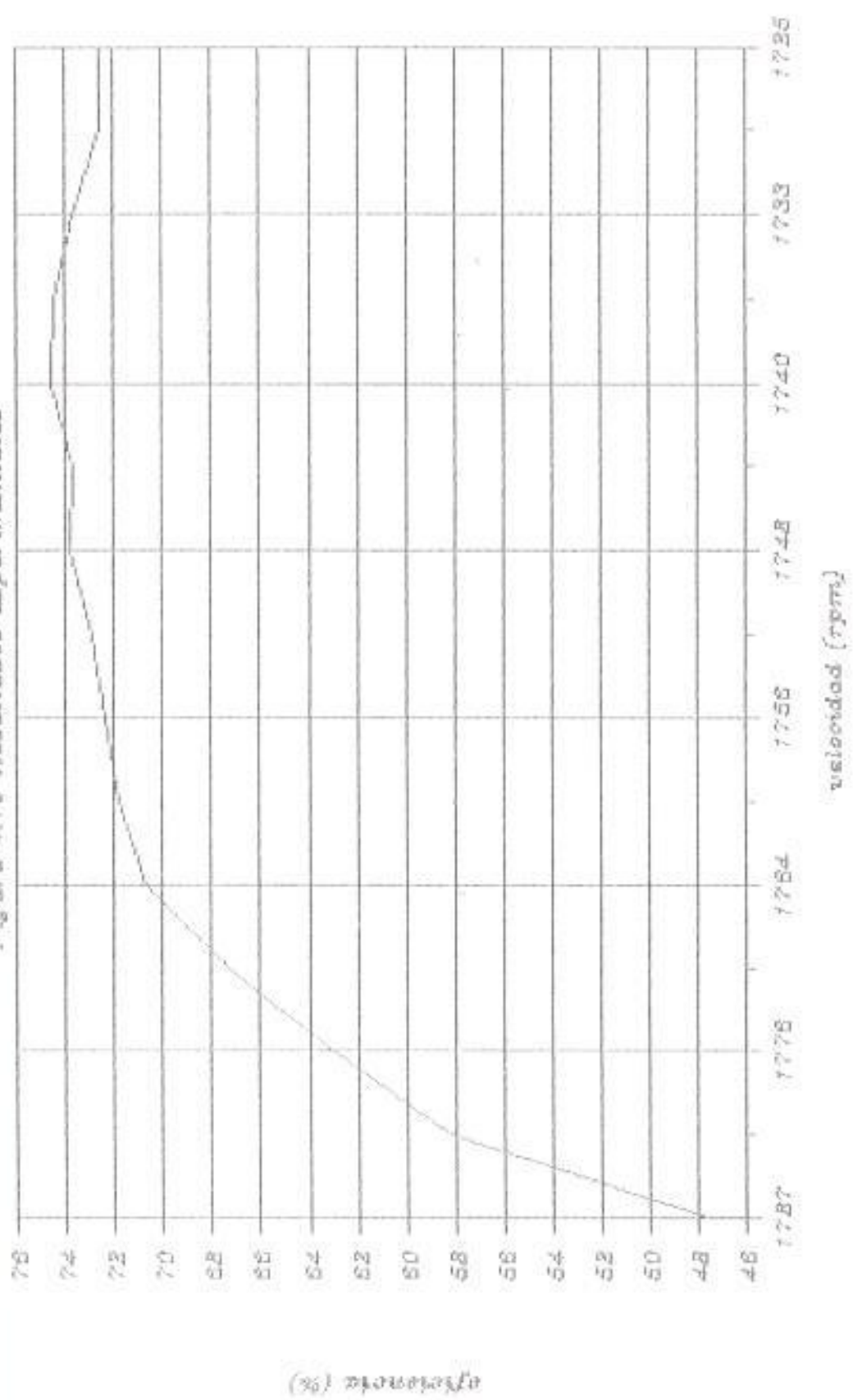
Tabla 4.9

RESULTADOS EXPERIMENTALES

N	I1	Pe	Tutil	Putil	Pjs	Pjr	Pnd	FP	Eff	S	Pgir	I2
RPM	AMP	WTS	Lb-Pie	WTS	WTS	WTS	WTS	%	%	%	WTS	AMP
1787	3.20	400.00	0.75	198.38	98.13	1.76	241.34	32.00	47.59	0.72	243.18	0.53
1782	3.30	500.00	1.15	291.09	95.65	3.37	334.00	39.76	58.22	1.00	337.38	0.73
1776	3.40	600.00	1.50	378.41	101.75	5.75	425.73	46.31	63.07	1.33	431.48	0.96
1770	3.50	710.00	1.90	477.70	107.82	8.92	526.40	53.24	67.28	1.67	535.41	1.19
1764	3.60	780.00	2.20	551.25	114.07	11.98	587.17	56.86	70.67	2.00	599.16	1.38
1759	3.70	870.00	2.50	624.64	120.50	15.55	667.18	61.71	71.80	2.20	682.73	1.57
1756	3.80	930.00	2.70	673.47	127.10	17.99	718.13	64.23	72.42	2.44	736.13	1.69
1753	3.90	990.00	2.90	722.12	133.88	20.61	768.74	66.62	72.94	2.61	789.35	1.81
1748	4.00	1060.00	3.15	782.13	140.83	24.62	827.77	69.54	73.79	2.89	852.40	1.98
1745	4.10	1110.00	3.30	817.97	147.96	27.36	867.91	71.05	73.69	3.06	895.27	2.08
1740	4.20	1160.00	3.50	865.06	155.27	31.27	906.70	72.48	74.57	3.33	937.96	2.23
1737	4.30	1210.00	3.65	908.58	162.75	34.32	946.16	73.85	74.43	3.50	980.48	2.33
1733	4.40	1270.00	3.80	935.43	170.41	38.44	994.38	75.75	73.66	3.72	1032.82	2.47
1729	4.50	1320.00	3.90	957.83	178.24	42.40	1032.59	76.98	72.56	3.94	1074.99	2.59
1725	4.60	1350.00	4.00	980.11	186.25	45.71	1051.27	77.02	72.60	4.17	1096.98	2.69

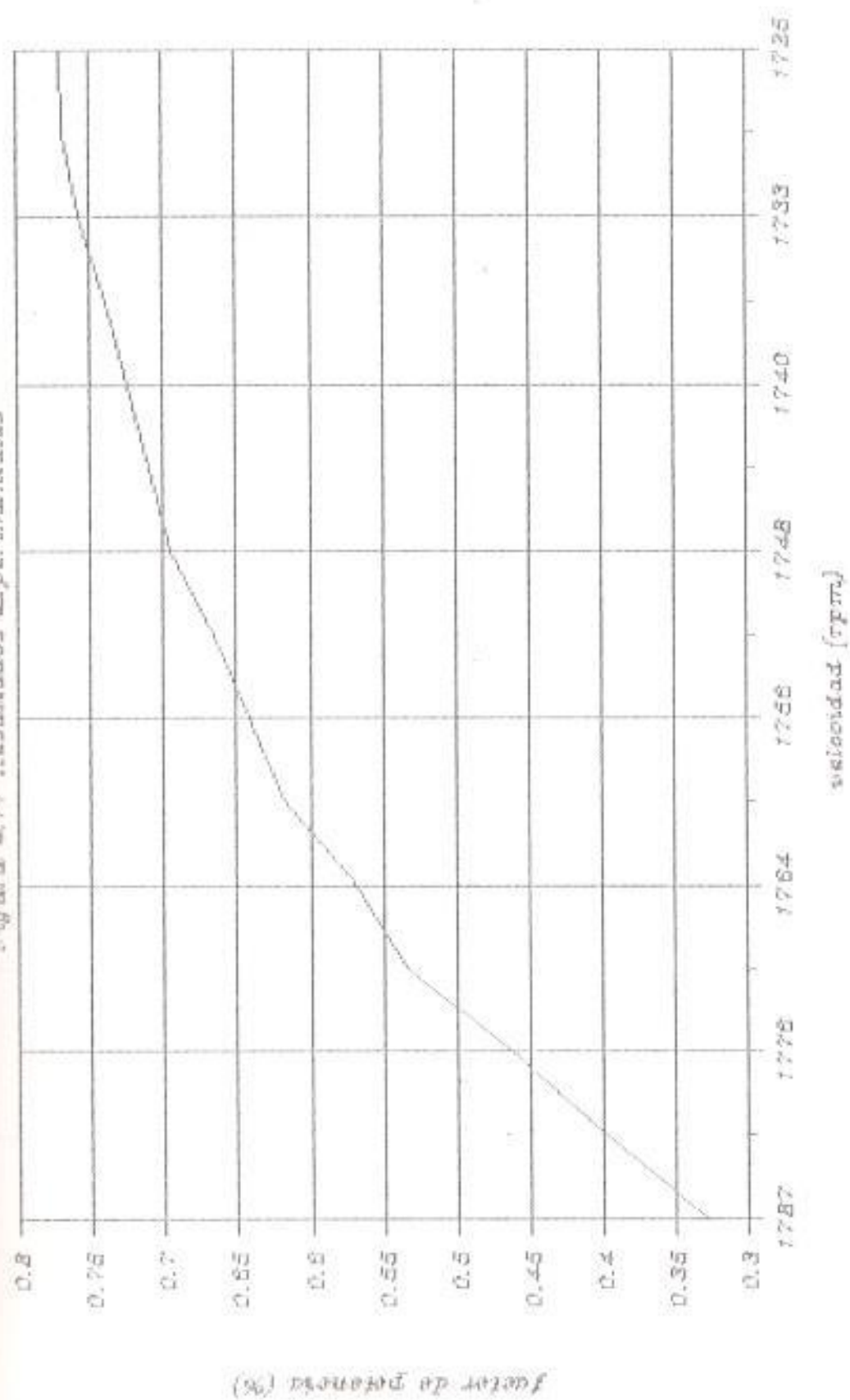
velocidad vs. eficiencia

Figura 4.10 Resultados experimentales



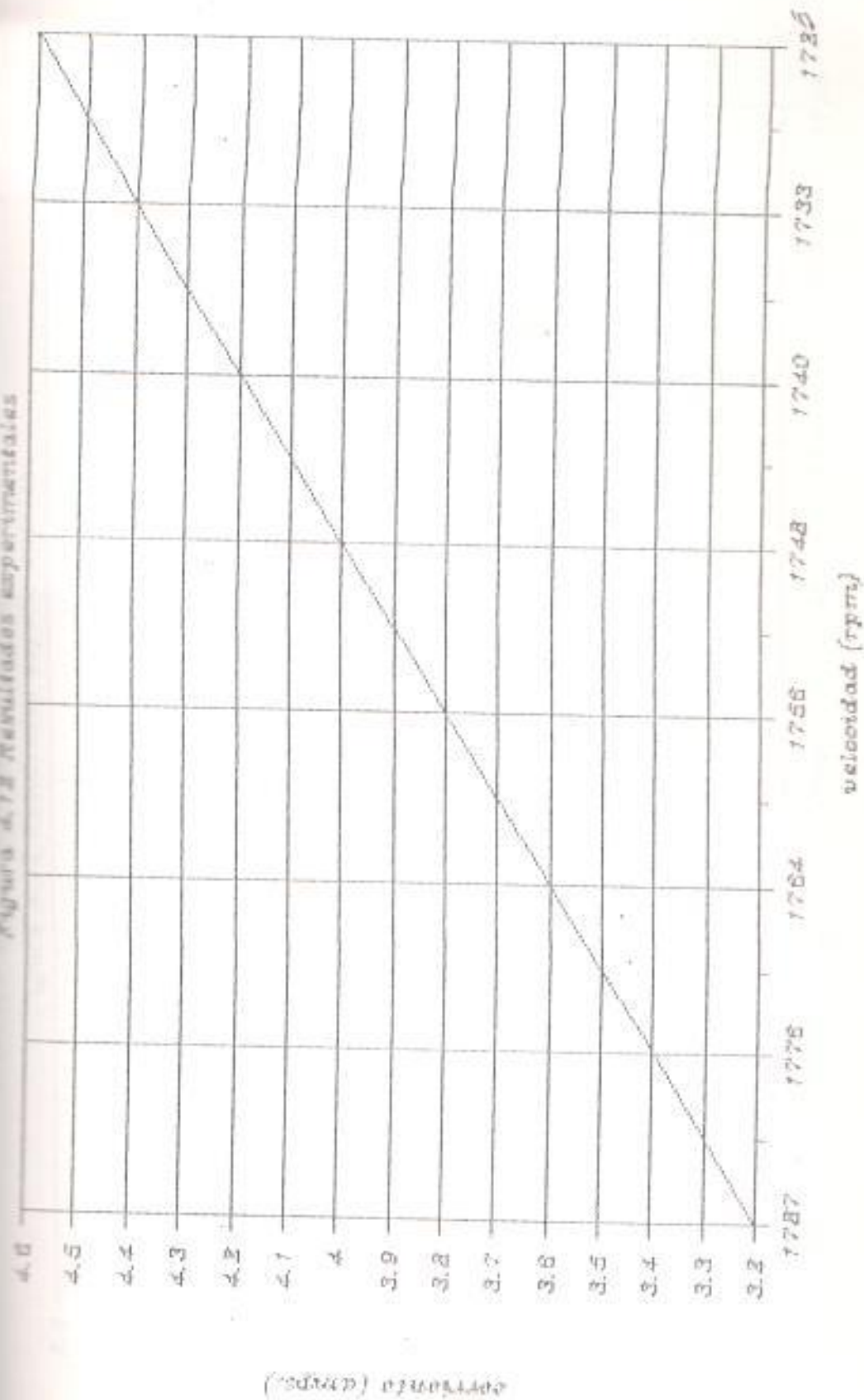
velocidad vs. factor de potencia

Figura 4.11 Resultados experimentales



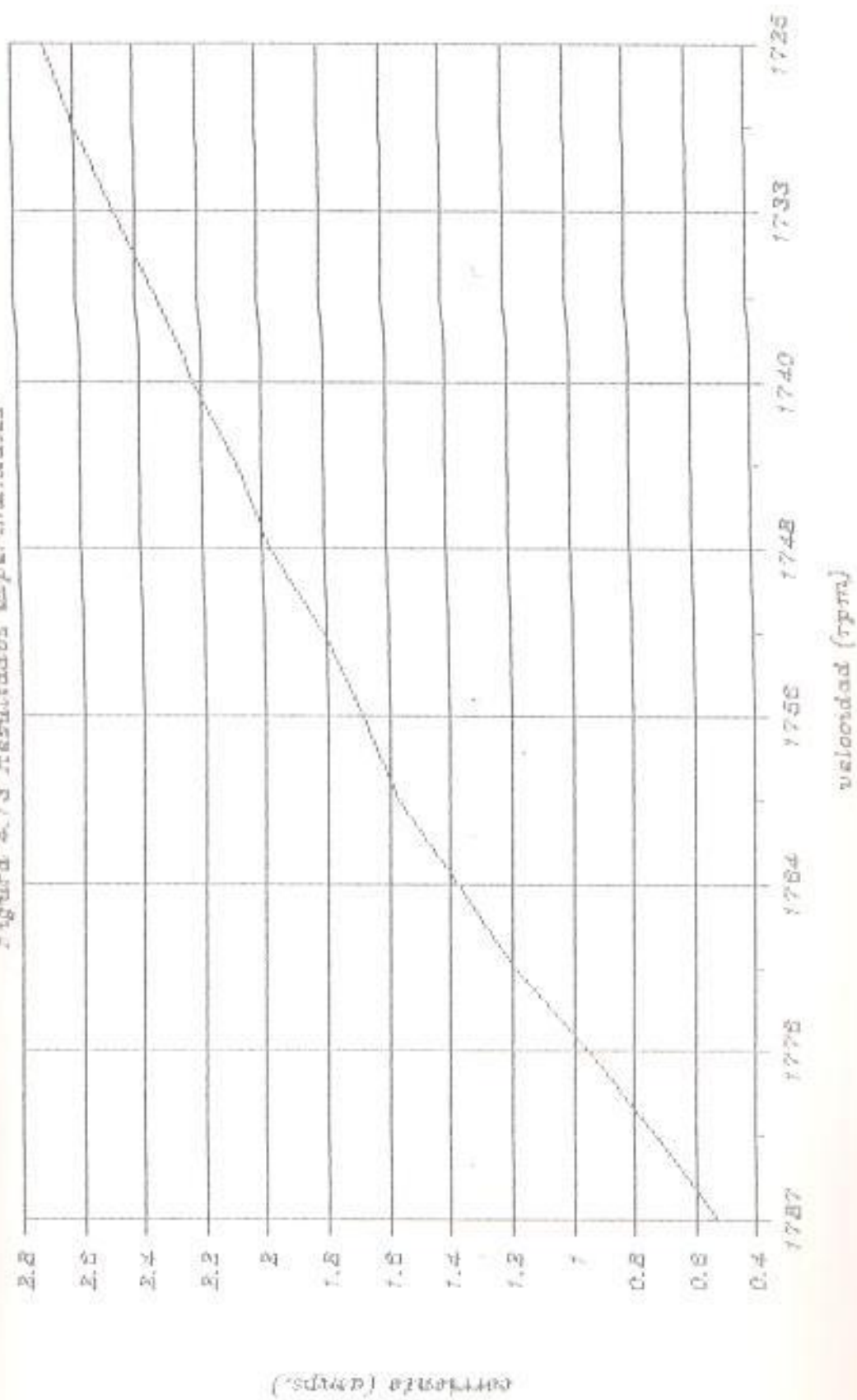
velocidad vs. corriente II

Figura 4.12 Resultados experimentales



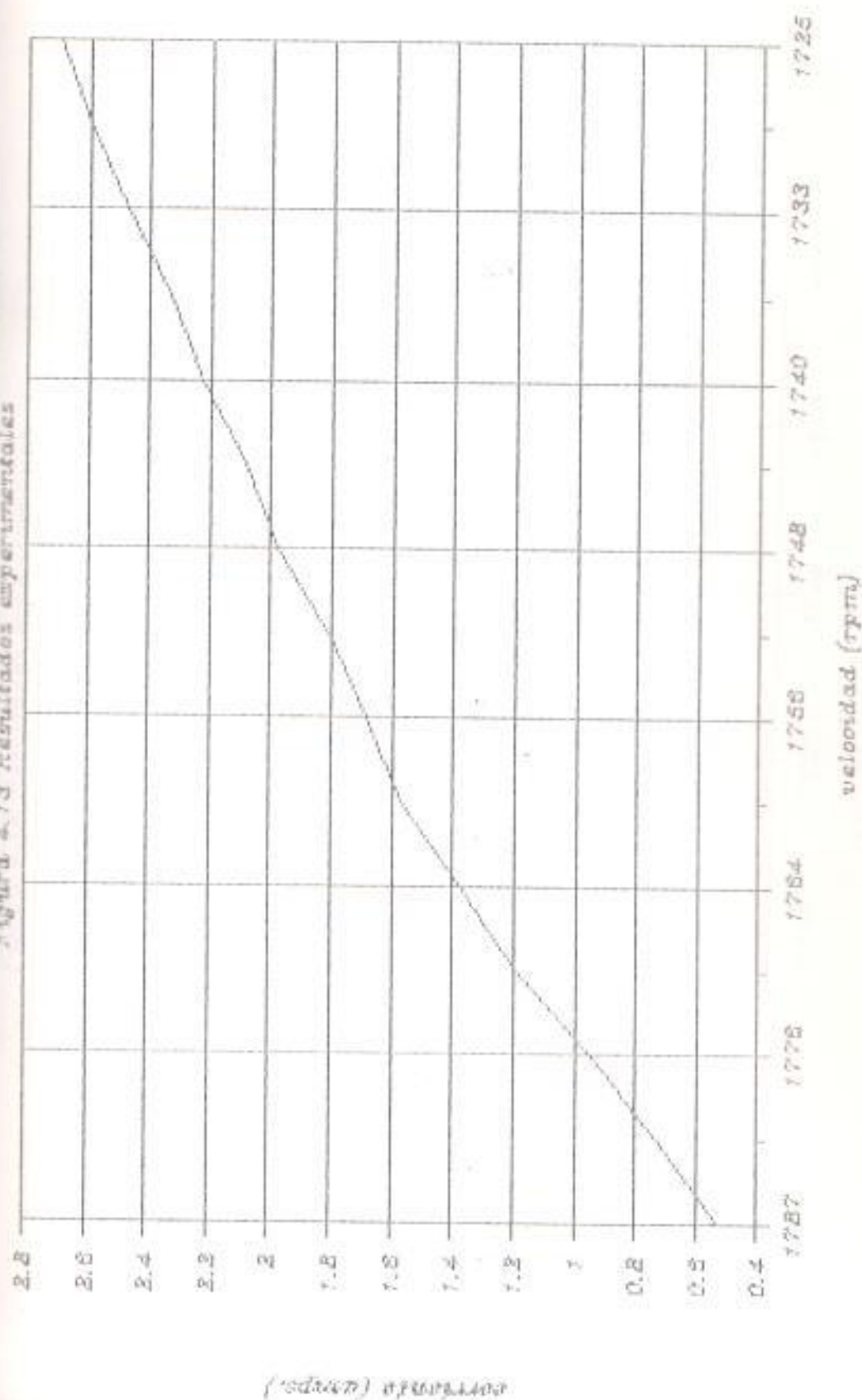
velocidad vs. corriente I2

Figura 4.13 Resultados experimentales



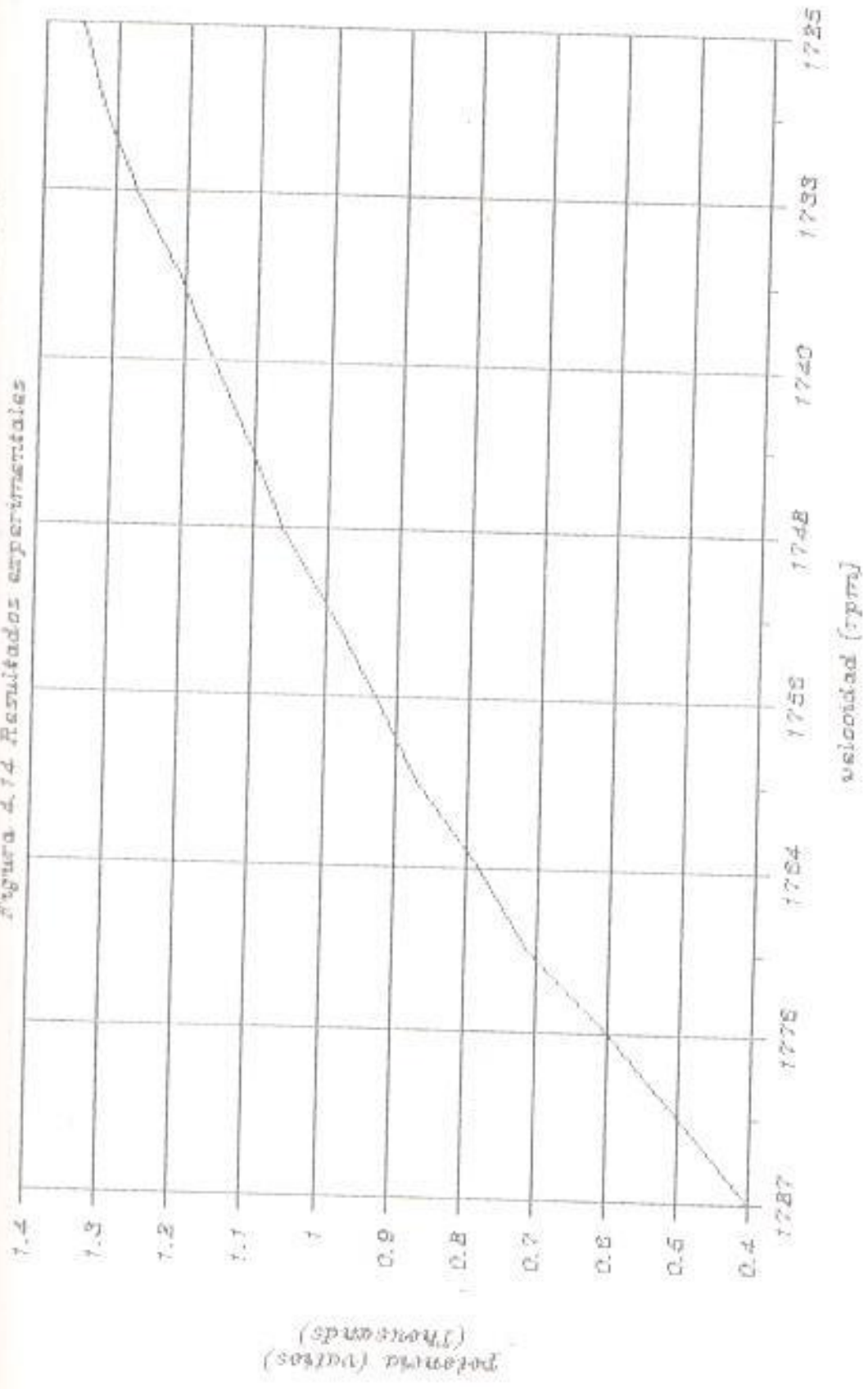
velocidad vs. corriente 12

Figura 4.13 Resultados experimentales



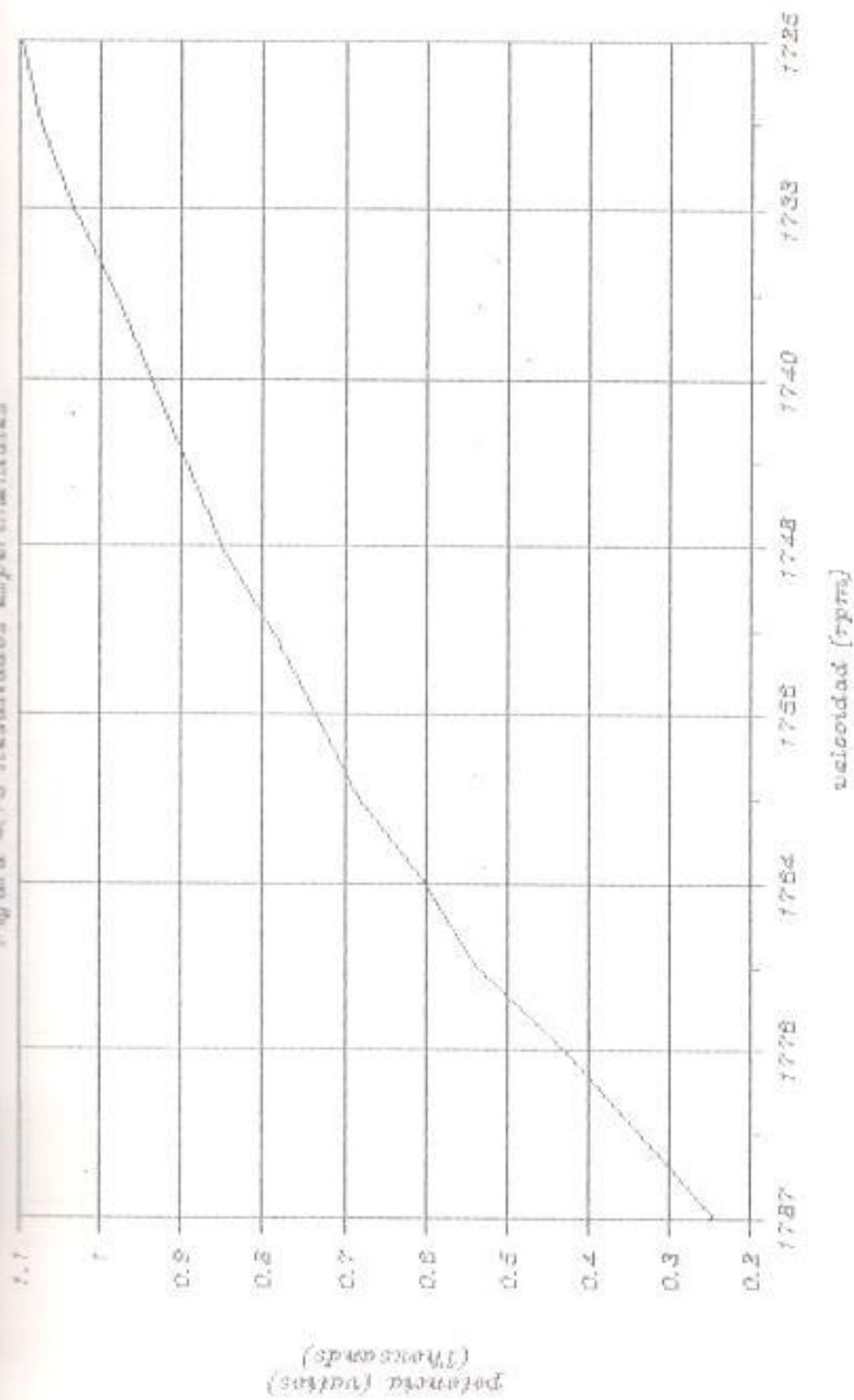
velocidad vs. potencia de entrada

Figura 4.14 Resultados experimentales



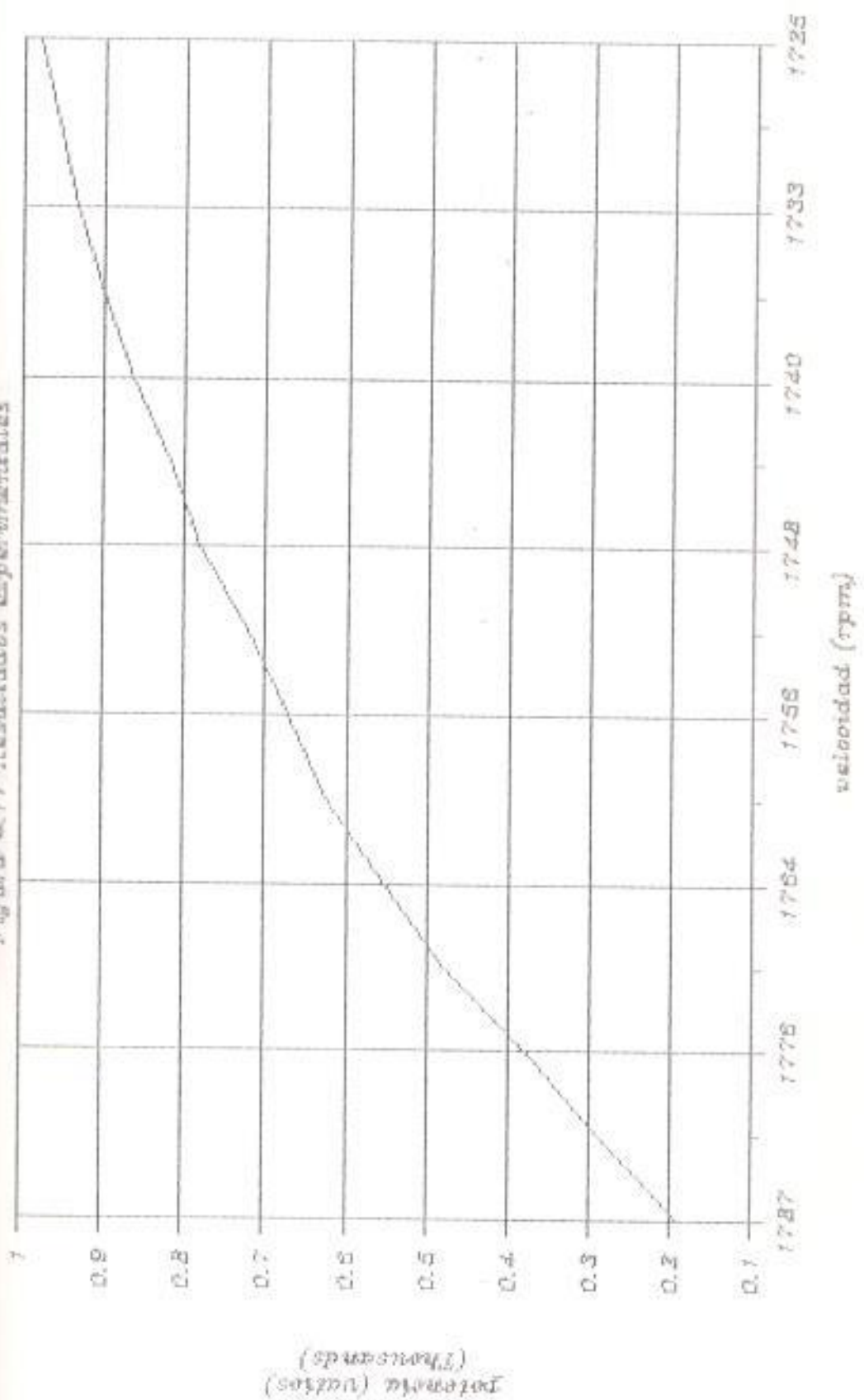
velocidad vs. potencia de giro

Figura 4.15 Resultados experimentales



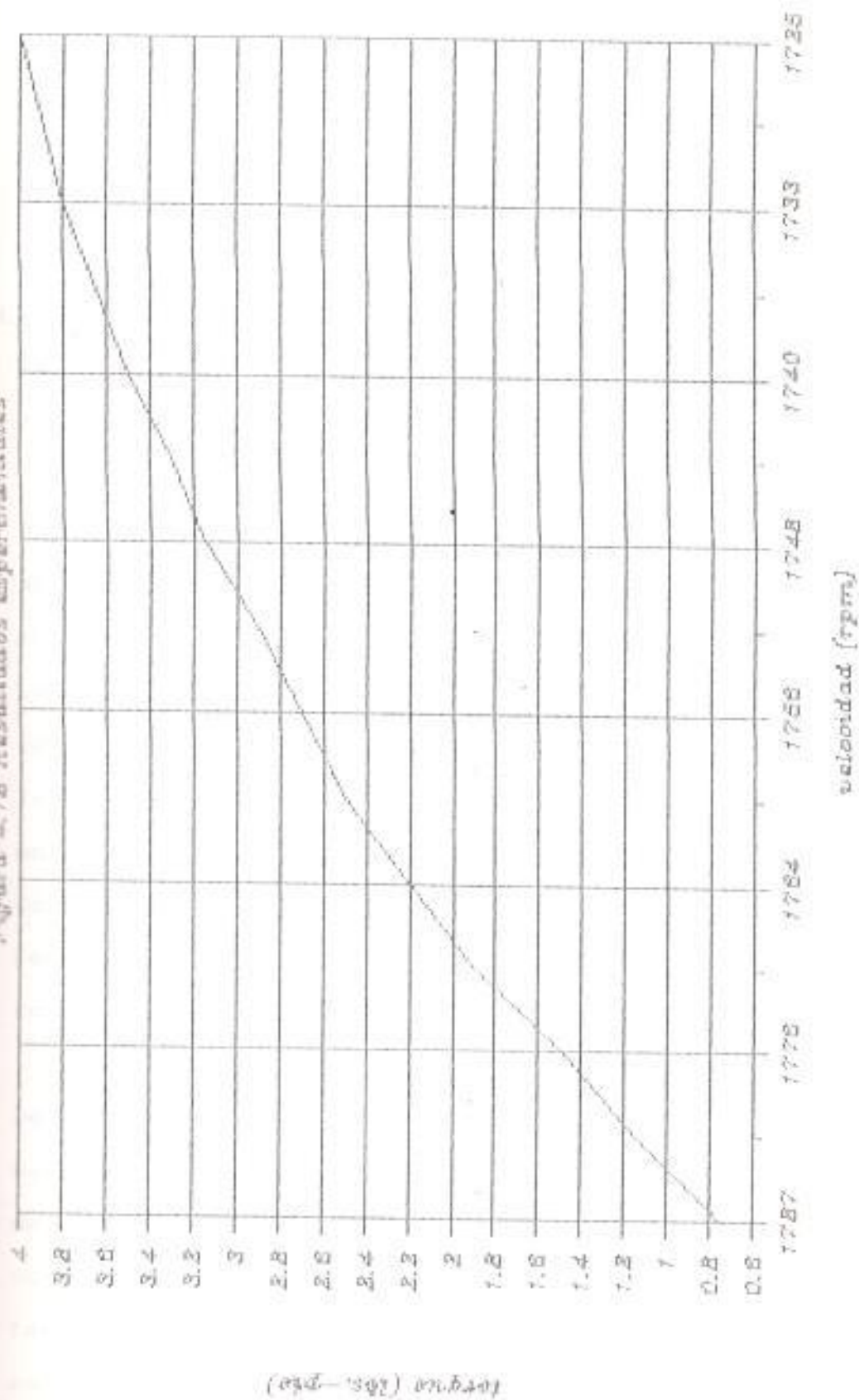
velocidad vs. potencia util

Figura 4.17 Resultados experimentales



velocidad vs. torque util

Figura 4.18 Resultados experimentales



CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO

5.1 PROGRAMAS DE COMPUTACION

Actualmente todas las ramas de la ingeniería se apoyan en el uso de las computadoras para analizar problemas difíciles y extensos. La utilización de las computadoras por el ingeniero eléctrico para la realización de los numerosos cálculos necesarios en la determinación de las características de los motores le permiten contar con un método preciso y confiable para obtener grandes conjuntos de resultados, que facilitan y aceleran el estudio del comportamiento del motor eléctrico.

Se ha escogido la utilización del lenguaje BASIC para la realización de los programas para el cálculo del comportamiento del motor polifásico de inducción por ser un lenguaje sencillo y que presta facilidades en la estructuración de los programas en este tipo de problemas.

A continuación se listan en los Apéndices 1 y 2, dos programas para la resolución del análisis del comportamiento del motor de inducción, el uno utilizando el circuito equivalente "T" y el otro el equivalente "L". Ambos están estructurados de la misma forma es decir se componen de: entrada de datos, cálculo de parámetros en el arranque, cálculo de parámetros en operación, impresión de los mismos, cálculo de las características del motor utilizando las diferentes técnicas, creación de un archivo de resultados e impresión tabulada de éstos.

En la primera parte de los programas se realiza el ingreso de los datos experimentales de las pruebas realizadas: medición de resistencia del estator, prueba de vacío, prueba de vacío ideal y de la prueba a rotor bloqueado. Luego el programa realiza el cálculo de los parámetros R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , R_0 , X_0 , G_0 , B_0 y también de P_{mec} y P_{h+f} , los cuales son las constantes del motor en el arranque. Estos resultados son enviados para su impresión tabular. La línea 550 corresponde a los códigos de la impresora DMP-105 (Tandy).

A continuación se realiza el cálculo de los parámetros durante la operación y los resultados son presentados igualmente impresos.

Se envía un tono para que se ingrese los valores del rango que se desea analizar y luego se pide la unidad de incremento para los diferentes puntos. Con estos datos el programa procede a realizar los cálculos correspondientes, con las fórmulas desarrolladas para el circuito equivalente "L" o "I" de acuerdo al programa que se esté utilizando, en el rango y con los incrementos especificados. Los resultados serán almacenados en un archivo e impresos en forma tabular. Para esto el programa pedirá que se ingrese el nombre del archivo y su vía de acceso.

El programa permite analizar otro rango con diferente incremento de ser el caso, y recalcula igualmente las características para el nuevo rango, manteniendo los valores de las constantes anteriormente estimadas. Así mismo es posible reiniciar el programa para ingresar valores de nuevas mediciones o pruebas realizadas, en cuyo caso el programa calculará otra vez los parámetros.

En las Tablas 1 y 2 se presentan los resultados obtenidos para el rango $N=1725$ a $N=1787$ con incremento unitario. Previamente los archivos de resultados generados por el programa fueron interpretados por Lotus.

5.2 ANALISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES TECNICAS

Para facilitar la comparación de los resultados obtenidos de las predicciones del comportamiento del motor polifásico de inducción, con los programas de computación, tanto para el circuito equivalente "L" como para el "T", contra los resultados de la prueba de carga obtenidos experimentalmente, se los ha graficado en las figuras 5.1 a 5.10. En estas curvas se presentan los valores característicos experimentales y de cada uno de los métodos vs. la velocidad en r.p.m..

Las curvas características correspondientes (Fig. 5.1) a la Eficiencia, presentan una estrecha variación entre la experimental y "T", con la salvedad que la del "T" continúa incrementándose sin definir en este rango el punto máximo. A pesar de la diferencia de un +10% aproximadamente del experimental con el "L", éste coincide con el experimental en el punto máximo de eficiencia. Se observa también que los valores experimentales decaen bajo el "T" una vez que se sobrepasa el punto máximo de eficiencia.

Del análisis de las curvas del Factor de Potencia (Fig.5.2), se puede decir que presentan gran

similitud en forma, existiendo por lo tanto una diferencia constante entre las tres curvas. Los valores del "T" y del "L" son inferiores a los experimentales, pero los del "T" están muy próximos a los experimentales.

Las curvas de I_1 (Fig. 5.3) así mismo tienen gran similitud en forma, notándose mayor exactitud en el "T", a pesar de que dicho valor es inferior al experimental. Los valores del "L" son superiores al experimental en un +10% aproximadamente.

En los valores de I_2 (Fig. 5.4), encontramos una mayor coincidencia con los resultados experimentales en el rango considerado, los cuales se aproximan aún más en las cercanías de la velocidad de sincronismo. En este caso tanto los valores tanto del "T" como del "L" son superiores a los experimentales.

Con referencia a la Potencia de Entrada (Fig. 5.5), los valores teóricos son ligeramente inferiores a los experimentales, pero ambos coinciden en su mayor parte, salvo pequeñas diferencias.

Con respecto a la Potencia de Giro (Fig. 5.6), existe coincidencia del "L" con el experimental en todo el rango considerado, por otra parte el "T" es

inferior a ambos valores, pero mantiene una forma similar de la curva.

En las pérdidas en el cobre del rotor, P_{J_r} (Fig. 5.7), encontramos nuevamente coincidencia de los valores del experimental con el "L", los valores del "T" son ligeramente inferiores.

La figura 5.9 nos muestra las curvas características correspondientes a la Potencia Mecánica Desarrollada, aquí observamos otra vez coincidencia de los valores del experimental con el "L" y valores próximos pero inferiores del "T".

En igual forma la Potencia Util y el Torque Util (Figs. 5.9 y 5.10), del "L", coinciden con los valores experimentales y así mismo el "T" es ligeramente inferior en ambos casos.

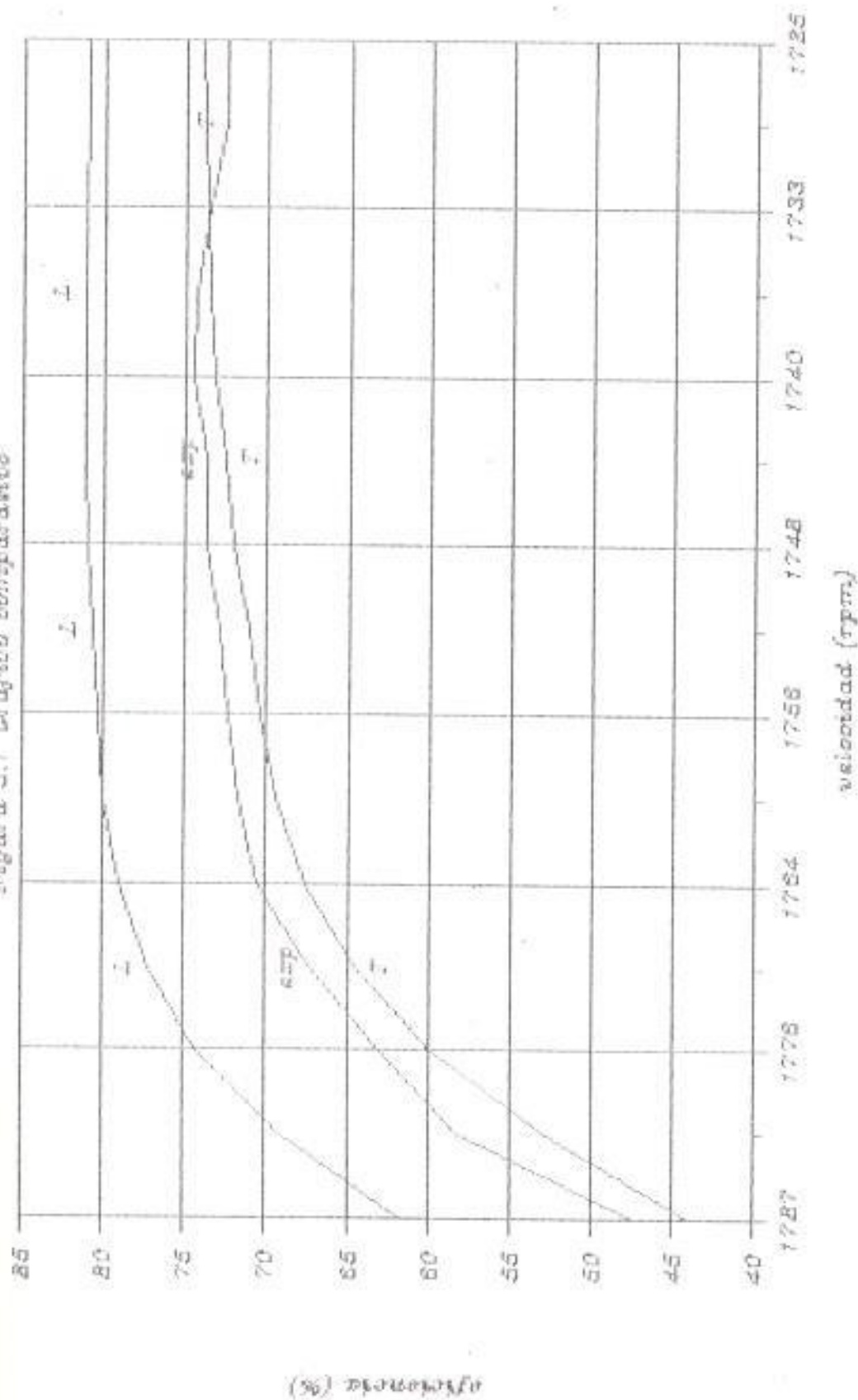
Resumiendo podemos decir, que existe coincidencia de los valores experimentales con los del "L" para los valores de las potencias, siendo los valores del "T", ligeramente inferiores. Salvo en el caso de la Potencia de Entrada en el cual ambos valores teóricos son inferiores al experimental.

En el caso de las corrientes, con respecto a la del

rotor ambos valores teóricos son ligeramente superiores a los experimentales y para la corriente de entrada notamos coincidencia del "T" con el experimental y valores superiores del "L".

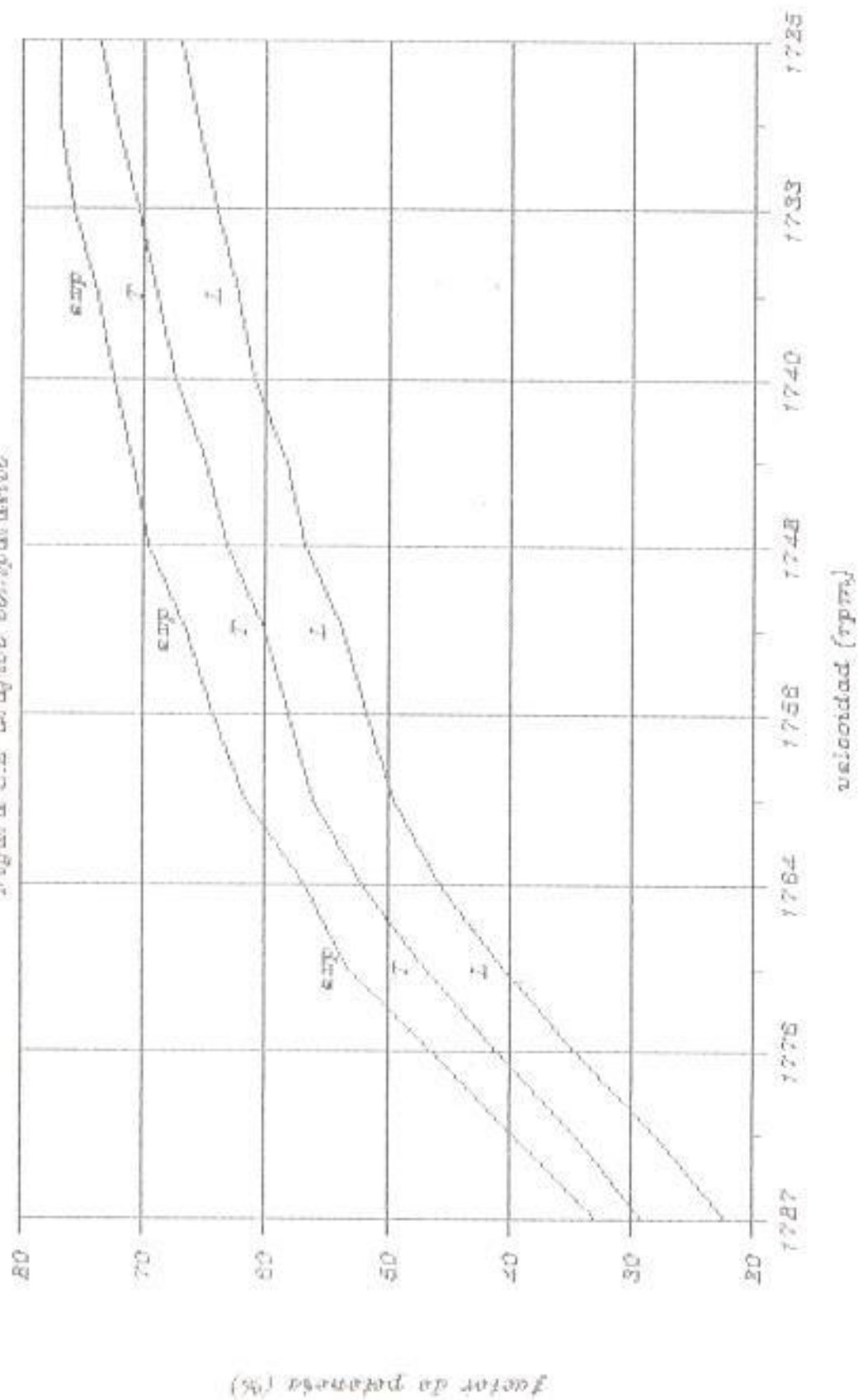
velocidad vs. eficiencia

Figura 5.1 Gráfico comparativo



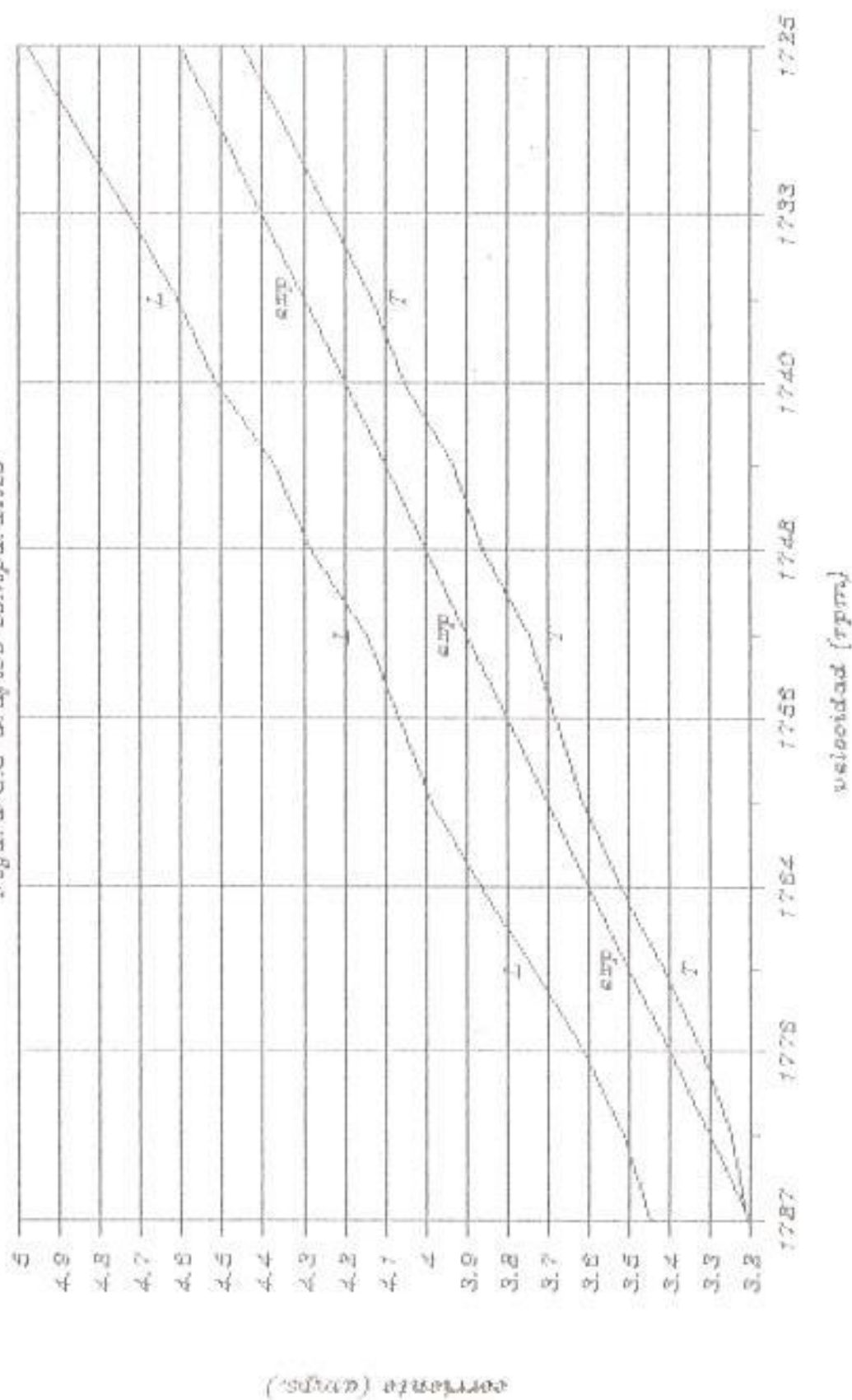
velocidad vs. factor de potencia

Figura 5.2 Gráfico comparativo



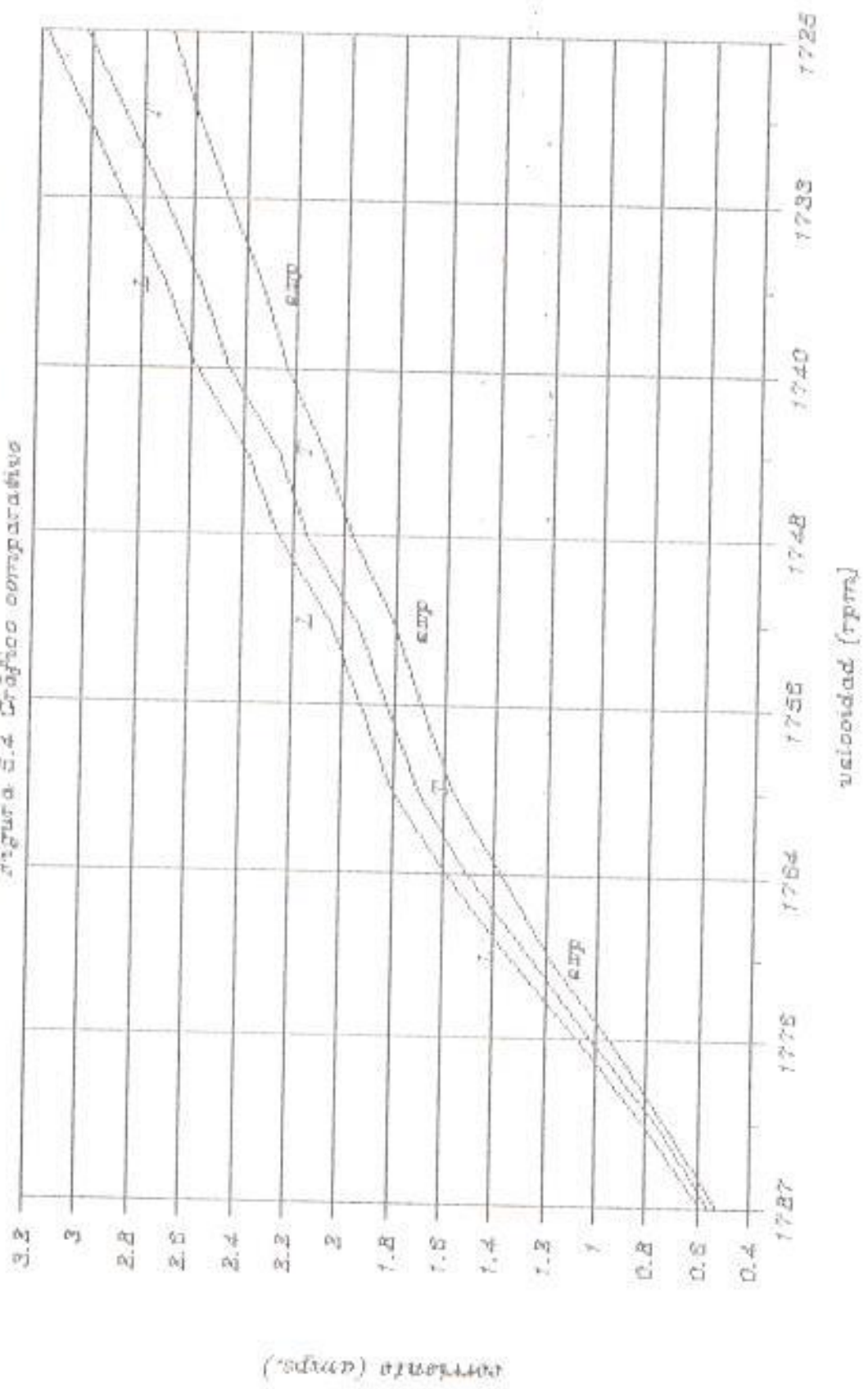
velocidad vs. corriente II

Figura 5.3 Gráfico comparativo



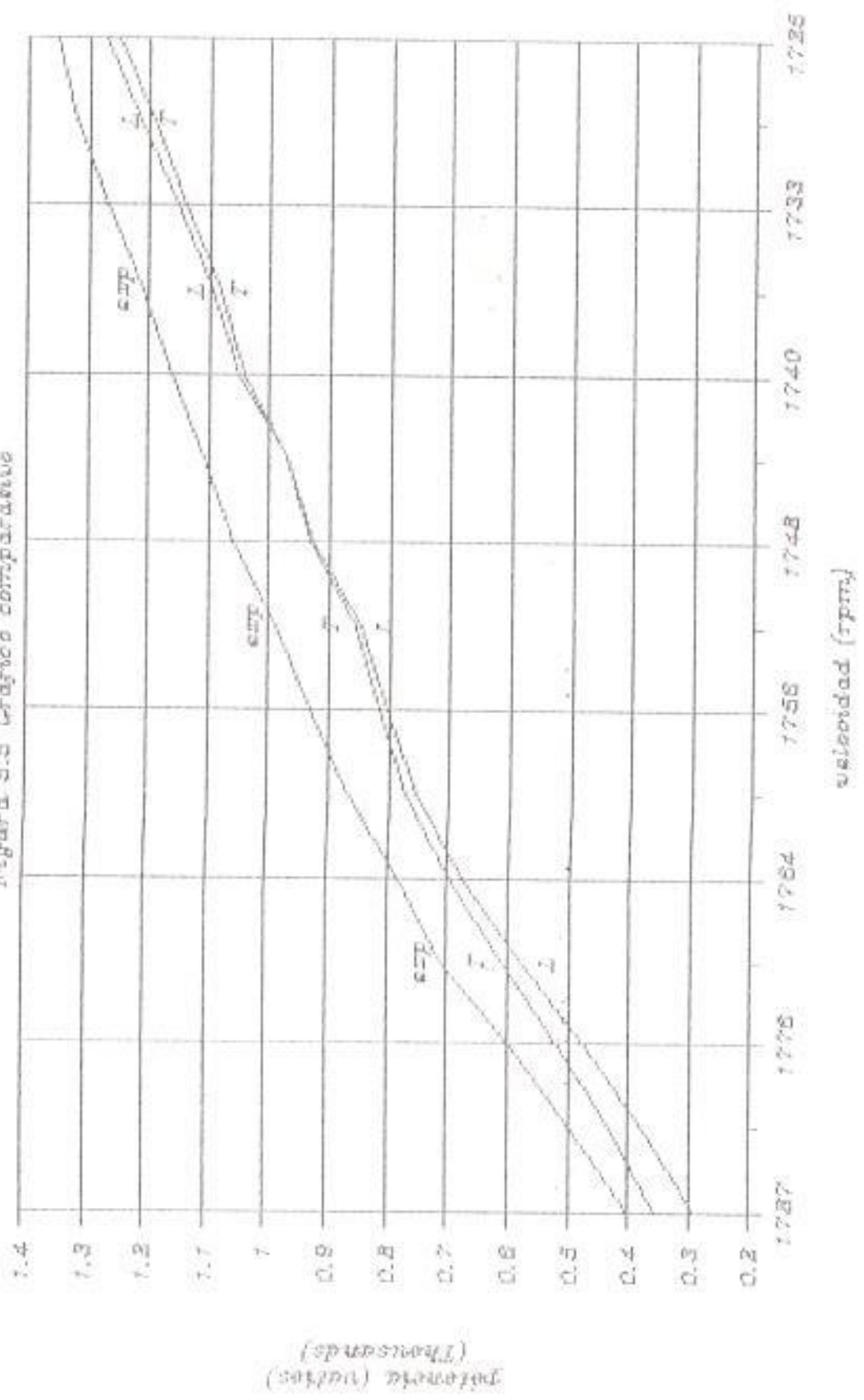
velocidad vs. corriente I2

Figura 5.4 Gráfico comparativo



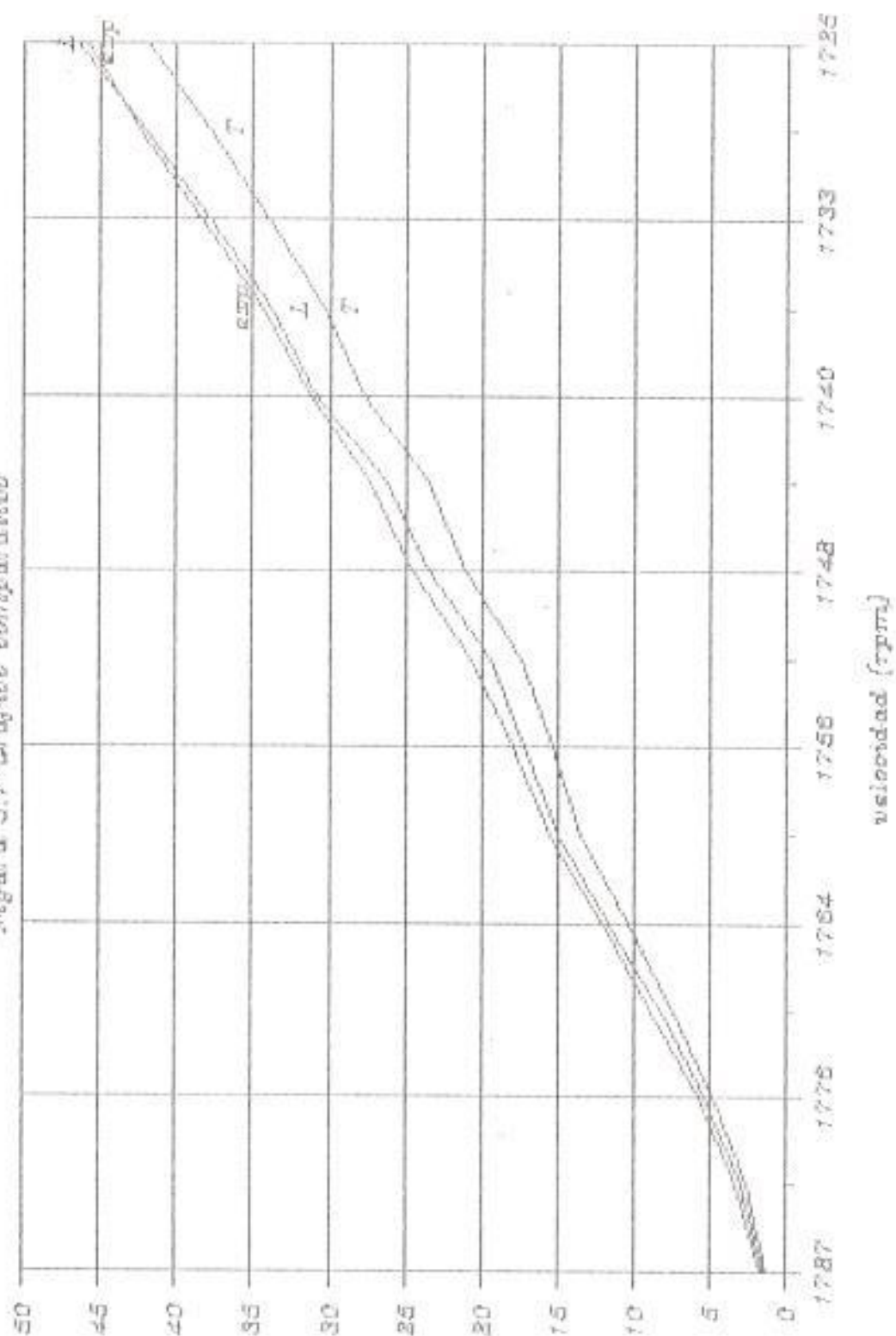
velocidad vs. potencia de entrada

Figura 5.5 Gráfico comparativo



velocidad vs. pérdidas cobre del rotor

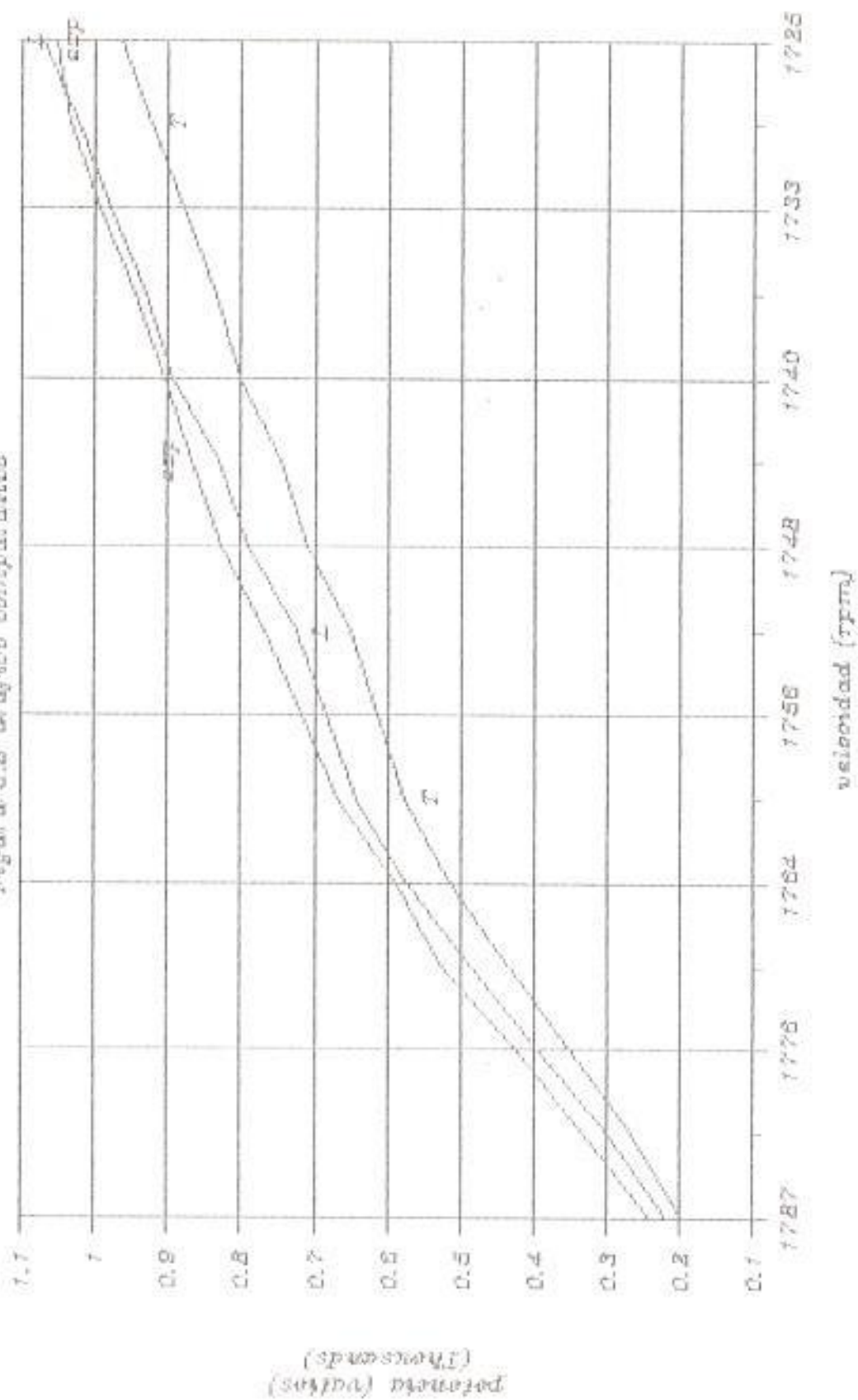
Figura 5.7 Gráfico comparativo



(pérdidas) rotor

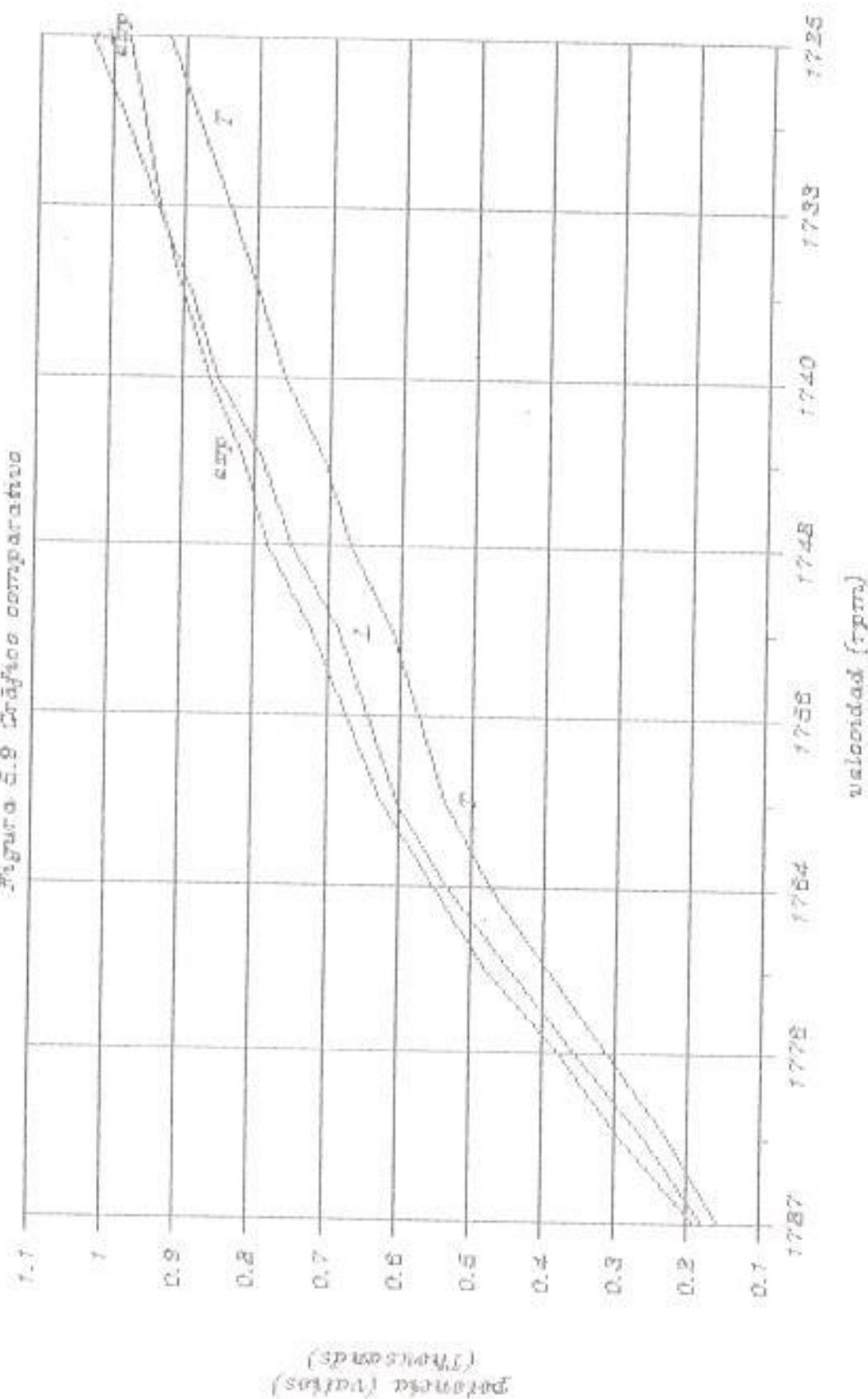
velocidad vs. potencia mec. des.

Figura 5.8 Gráfico comparativo



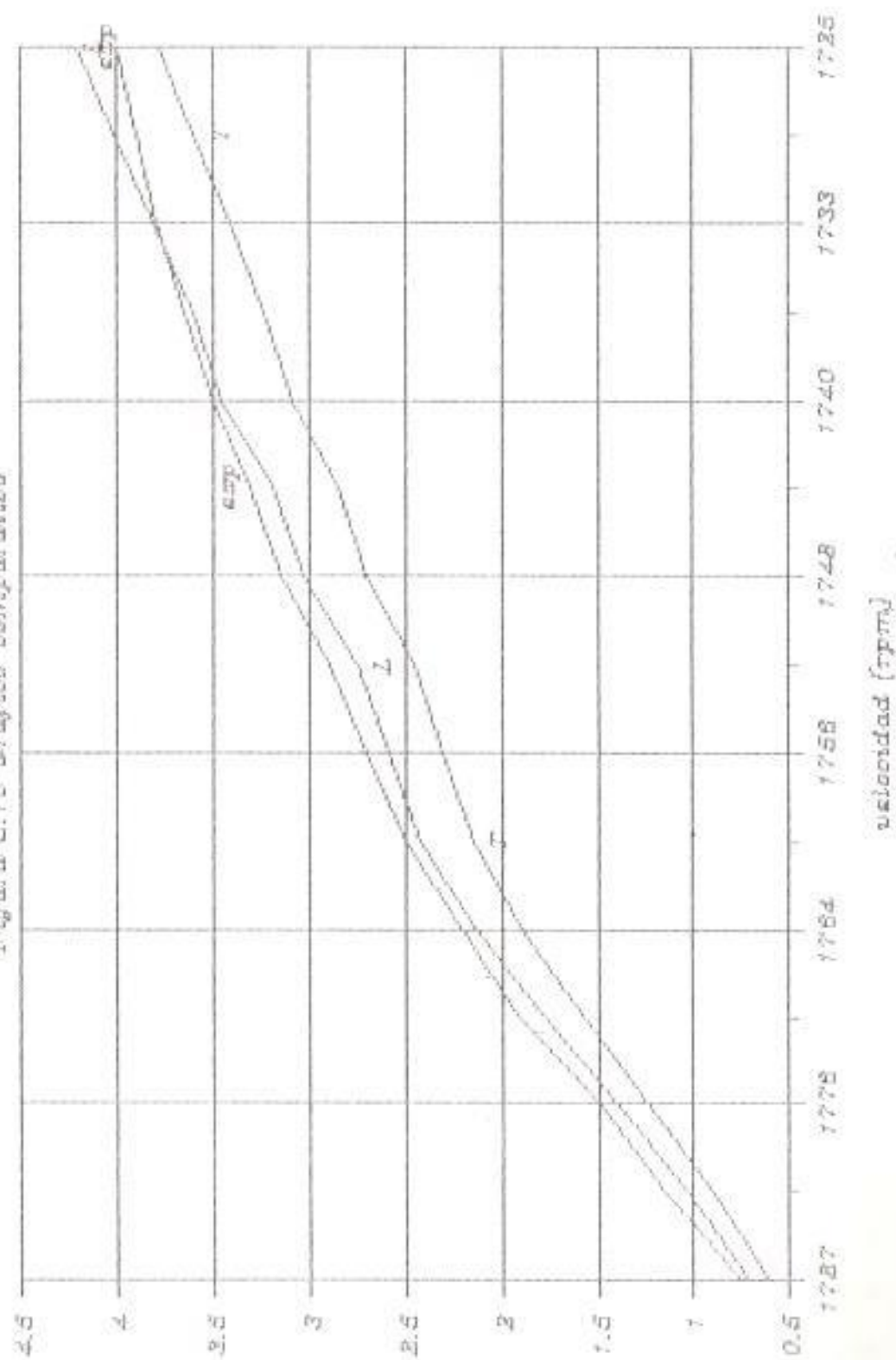
velocidad vs. potencia util

figura 5.9 Gráfico comparativo



velocidad vs. torque util

Figura 5.10 Gráfica comparativa



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque el comportamiento del motor polifásico de inducción puede visualizarse por el diagrama de círculo, es inconveniente hacer cálculos repetidos por métodos gráficos. Para este propósito el cálculo directo desde el circuito equivalente ofrece un método más versátil y conveniente para el análisis.

El fundamento en el cual se basa la exactitud de los diferentes métodos usados para predecir el comportamiento se apoya totalmente en la precisión con la que se obtienen los parámetros de la máquina.

La utilización del circuito equivalente "T" en contraposición al más sencillo "L" equivalente puede justificarse solamente si los valores de los parámetros se obtienen con un alto grado de precisión. Sin embargo existen algunas fallas en el cálculo de los parámetros. En primer lugar los valores de R_2 y X_1 son obtenidos utilizando los resultados de la prueba a rotor bloqueado, también se asume que $X_1 = X_2 = X_1/2$, y de las pruebas efectuadas para encontrar separadamente estos valores se ha

demostrado la imposibilidad de lograrlo con cierto grado de precisión. De hecho cualquier método diseñado para obtener los valores de X_1 y X_2 no tiene significado práctico puesto que estos valores están sujetos a variación en el rango de carga de la máquina.

Aunque no han sido consideradas las pérdidas por armónicos, ni de torques parásitos, los resultados para los valores teóricos de las potencias en ambos métodos tienen suficiente aproximación a los resultados experimentales como para ser considerados válidos.

Así mismo se observa la casi coincidencia y gran aproximación de los valores teóricos estimados del método "L" con los experimentales. Por lo cual se puede afirmar que la utilización del circuito equivalente "L" ofrece una mejor idea y más precisa del comportamiento de la máquina, pudiéndose afirmar que es el método más conveniente para realizar un análisis preciso del motor de inducción.

Dentro del campo de la teoría y para efectos de diseño de motores de inducción es posible, realizar transformaciones al circuito "T", utilizando el teorema introducido por Douglas y probado con los

teoremas de Thevenin Hemholtz y el de superposición, que den una representación más exacta de la realidad física y que brinden mayor facilidad para el establecimiento de las ecuaciones que permiten determinar el comportamiento del motor.

Sería recomendable investigar estas nuevas transformaciones del circuito "I", realizar las simplificaciones necesarias, para que el circuito equivalente en realidad tenga importancia práctica y comparar sus resultados contra los valores experimentales.

BIBLIOGRAFIA

1. ALGER, P.L. " The Nature of Polyphase Induction Machines ", John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1951.
2. DRAPER, A. " Electrical Machines ", Longman Inc., New York, N.Y., 1967.
3. LANGSDORF, A. " Theory of Alternating Current Machinery ", Mc Graw Hill, New York, 1963.
4. LAWRENCE, R. " Principles of Alternating Current Machinery ", Mc Graw Hill, Inc., 1953.
5. LIWSHITZ, GARIK and CLIDE " Máquinas de Corriente Alterna ", C.E.C.S.A., 1959.
6. MIDDENDORF, W.H. " Analysis of Electric Circuits ", John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1950.
7. MIDDENDORF, W.H. " Calculation of Induction Motor Torque and Power ", AIEE Transaction, December 1958.