



UNSE

Universidad Nacional
de Santiago del Estero



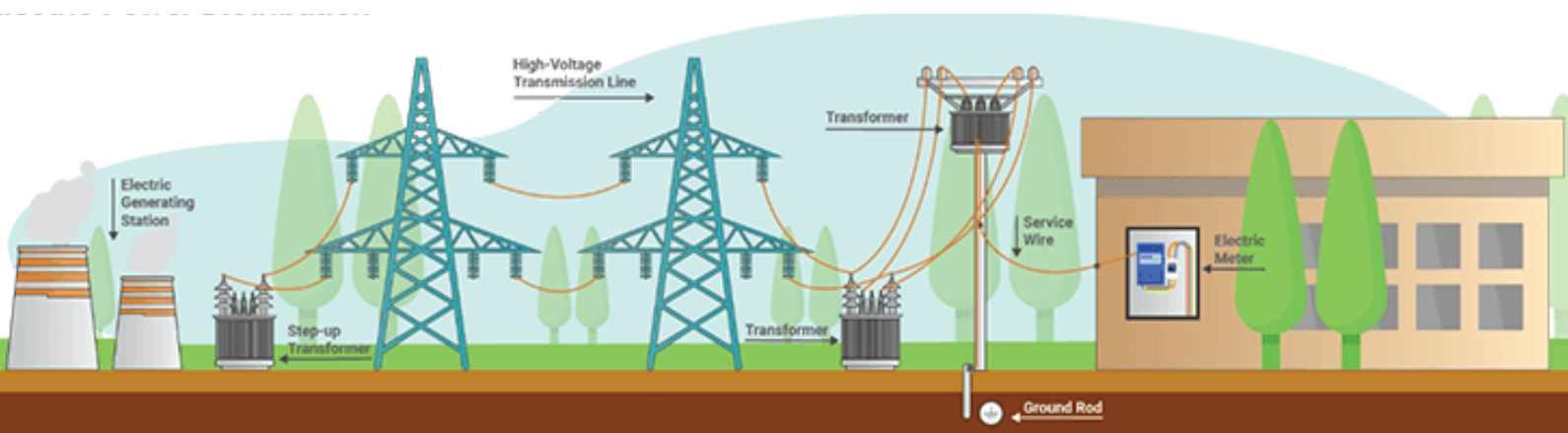
Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnologías

Santiago del Estero, 11 de junio del 2025

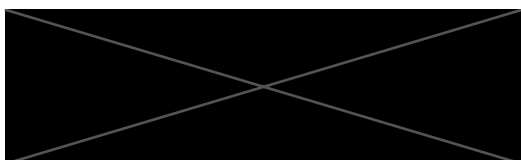
Ingeniería eléctrica

***TP N° 7: Medición de Potencia Trifásica, en sistemas
equilibrados, de tres hilos.***

Medidas eléctricas



DOCENTES:



ALUMNO

- Chevauchey Clément

ÍNDICE

Objetivos	3
Materiales usados	3
Desarrollo	5
Datos y cálculos	9
Resultados y conclusión	12
Referencias	13

Objetivos

- Familiarizarse con la medición de potencia trifásica, en sus diferentes formas de medición.
- Determinación de los errores en la medición y cálculo de los mismos.

Introducción

En sistemas eléctricos trifásicos, la medición de **potencia activa** y **reactiva** es fundamental para evaluar el **rendimiento** y el **consumo** de energía de las **cargas** conectadas. En este trabajo práctico se utiliza el **método de Aron**, una técnica basada en el **Teorema de Blondel**, que permite medir la potencia activa y, en condiciones **equilibradas**, también la potencia **reactiva** en sistemas trifilares **equilibrados**, utilizando solo **dos vatímetros**.

La **potencia activa** (P) es la energía que se transforma efectivamente en **trabajo útil** (mecánico, térmico, etc.)

La **potencia reactiva** (Q) está asociada a la creación de **campos magnéticos o eléctricos** en cargas **inductivas o capacitivas**.

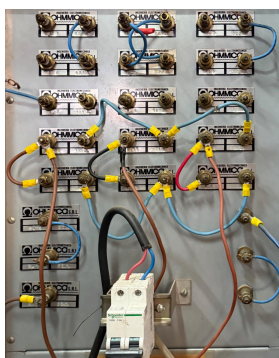
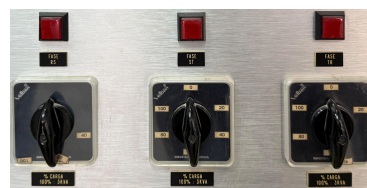
La **potencia aparente** (S) relaciona la potencia activa y reactiva mediante el triángulo de potencias.

El análisis de las lecturas de los **vatímetros** permite, además, determinar el **tipo de carga** (resistiva, inductiva o capacitiva) en función de sus **signos** y **valores relativos**.

Finalmente, se tendrá en cuenta el **cálculo de errores** asociados a los **instrumentos** de medición, considerando tanto las características **internas** de los **vatímetros y voltímetros**, como los **desfases** y la **sensibilidad** de los **transformadores de corriente** que se utilizan.

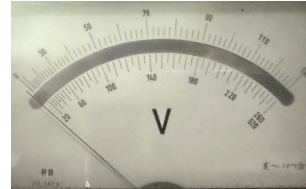
Materiales usados

- Banco de cargas capacitivas
 - 9 K-VA
 - 380 V
- Motor
 - Voltaje de entrada 220 VAC
 - Corriente de línea 4,8 A
- Banco de resistencias



- Amperimetro

- Hierro movil
- Corriente alterna
- Clase de exactitud de 1
- Posición de funcionamiento acostada
- Clase de aislamiento Clase 2 doble aislamiento, no necesita conexión a tierra
- Connexion 6A
- Resistencia interna: $R_a=0,1$ ohmios



- Voltmetro

- Hierro movil
- Corriente alterna
- Clase de exactitud de 1
- Posición de funcionamiento acostada
- Clase de aislamiento Clase 2 doble aislamiento, no necesita conexión a tierra
- Connexion 520 V
- Resistencia interna: $R_v= 40$ k-ohmios



- Watimetro

- Electrodinámico con circuito de hierro
- Corriente alterna
- Clase de exactitud de 0,5
- Posición de funcionamiento acostada
- Clase de aislamiento Clase 1 = aislamiento básico y conexión a tierra de protección obligatoria.
- 550 ohmios / 3 V
- Inductancia interna $L_w = 5$ mH
- Connexion 480 V / 5A
- Alcance de 2400 W

- Transformador de Intensidad

- Clase de exactitud: 0,2
- Relación de transformación:
 - Entrada: 50 – 25 – 10 ; Salida: 5
- Frecuencia de servicio: 50 Hz
- Tension de servicio: 500V
- Carga máxima admisible 5VA



Desarrollo

Luego de verificar el correcto funcionamiento del disyuntor diferencial del laboratorio, se procedió al armado del circuito para la medición de potencia trifásica, utilizando el **método de Aron**, mediante la conexión de **dos vatímetros** en un sistema **trifásico equilibrado de tres hilos**.

Se conectaron los **Transformadores de Intensidad (TI)**, los **vatímetros (W1 y W2)**, el **voltímetro (V)**, y los **amperímetros (A1, A2)**. La carga utilizada fue una carga equilibrada trifásica. El circuito se armó según el esquema del método de Aron, incluyendo transformadores de intensidad para mayor seguridad y precisión en la medición (*Imagen 1*).

Los **Transformadores de Intensidad** se conectaron del lado derecho de la mesa de trabajo (*Imagen 2*).

A partir de ellos, las **tensiones** se derivaron hacia la **primera línea de cada una de las tres borneras de maniobras**, mientras que las **corrientes** se conectaron a la **segunda y tercera línea** de dichas borneras de maniobras (*Imagen 3*).

Esta disposición permitió separar la parte de potencia de la parte de medición para que todas la manipulaciones se realizará desde el **secundario de los transformadores**, mejorando la **seguridad**.

Además de la seguridad, las **borneras de maniobras** se utilizaron para permitir el **cortocircuito en el secundario** de los **transformadores de corriente** al momento de **extraer o reemplazar instrumentos** ya que **nunca** debe **abrirse** el **circuito secundario** de un transformador de corriente.

Los TI se configuraron con una relación de transformación de **10/5**, equivalente a un **K = 2**. Los vatímetros se conectaron en sus bornes de corriente de **5 A** y de tensión de **480 V**. Los amperímetros se utilizaron en la escala de **6 A**, y el voltímetro en la escala de **520 V**.

El sistema fue alimentado directamente desde la red **trifásica de la planta piloto de la facultad**, y se verificó que la corriente en los vatímetros no excediera los **5 A**, ni que la tensión en sus bobinas supere los valores nominales, para evitar daños en los instrumentos.

Durante el desarrollo del laboratorio se utilizaron distintos tipos de cargas con el fin de analizar el comportamiento de las lecturas de los vatímetros ante diferentes ángulos de desfase. Para la carga **inductiva (L)** se utilizó un **motor trifásico**, para la carga **capacitiva (C)** se empleó un **banco de capacitores**, y para la carga **resistiva (R)** se utilizó un **banco resistivo**. De este modo fue posible observar y comparar los casos de cargas puramente resistivas, inductivas, capacitivas y combinadas (RL, RC), según el ángulo de desfase generado en cada configuración.

Previo a la conexión definitiva del circuito de medición, se procedió a verificar la **secuencia de fases** del sistema trifásico mediante el uso de un **rotador de fase**.

El **rotador de fase** utilizado cuenta con tres bornes de entrada identificados como **L1, L2 y L3** (R, S, T), los cuales se conectan directamente a las tres fases.

Se identifican los vatímetros 1 y 2 con el orden de orden de fases:

- Si la secuencia es **(R-S-T)**, la luces prenden en sentido **horario**
- Si la secuencia es **(R-T-S)**, la luces prenden en sentido **antihorario**

En nuestro caso la secuencia era **R-S-T**, no fue necesario el **intercambiando dos fases** en las borneras de maniobras del tablero de conexión.

A continuación, se registraron:

- Las lecturas de ambos **vatímetros**.
- Las **lecturas de corriente** en cada fase mediante los amperímetros.
- La **tensión entre líneas** con los voltímetros.
- La **relación de transformación de los TIs** y sus datos nominales.
- La **cantidad de divisiones, alcance, clase de exactitud, resistencia interna** y características inductivas de cada instrumento, necesarias para el cálculo de errores.
- El **error de relación** y el **error de ángulo** de los transformadores de intensidad.

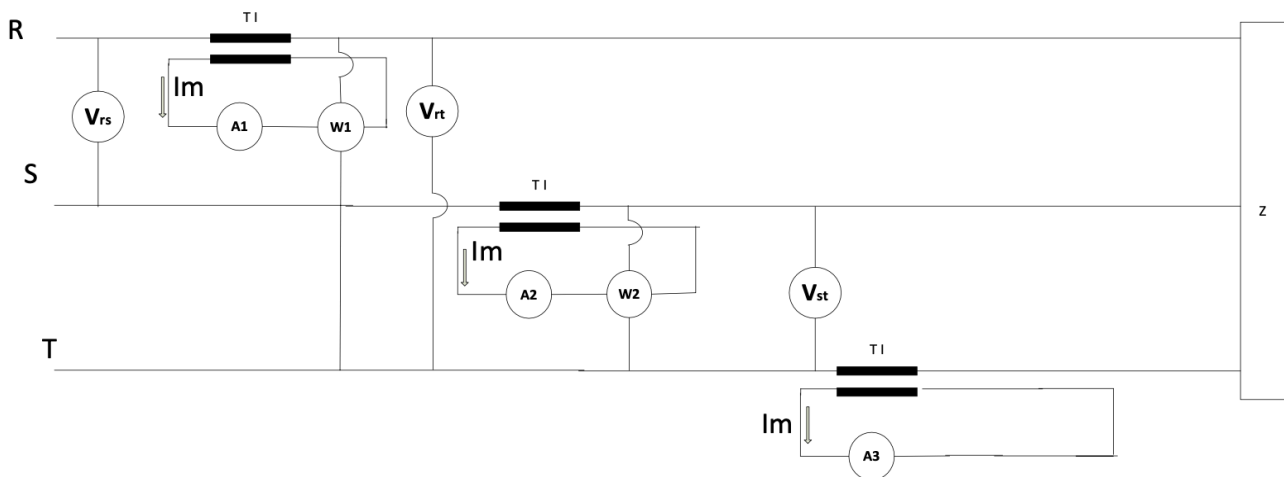


Imagen 1¹

¹ Apuntes de cátedra, Medidas Eléctricas, UNSE.



Imagen 2



Imagen 3

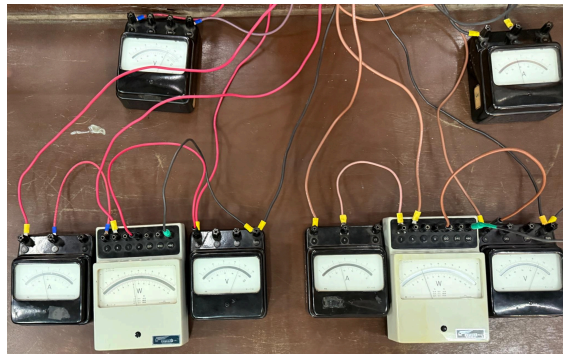


Imagen 4



Imagen 5

Una vez finalizadas las conexiones y verificada la secuencia de fases, se procedió a medir las **tensiones entre líneas** y las **corrientes de fase** con el objetivo de comprobar que el sistema estuviera **correctamente equilibrado**. Las lecturas iniciales de tensión y corriente fueron similares en las tres fases, lo cual confirmó que la conexión y la carga instalada presentaba un comportamiento equilibrado, condición necesaria para aplicar válidamente el método de Aron.

Carga puramente resistiva

Posteriormente, se conectó únicamente el **banco resistivo (R)**. Al tratarse de una carga **puramente resistiva**, se observó que ambos vatímetros marcaban el **mismo valor**, lo cual coincide con lo esperado teóricamente, dado que el ángulo de desfase es igual a 0.

Carga RL

A continuación, se conectó el banco **resistivo (R)** junto al **motor trifásico (L)**, formando una carga **RL**. En este caso, se observó que los valores indicados por los vatímetros eran distintos: $W_1 > W_2$, como se espera cuando existe un **ángulo de desfase positivo** entre tensión y corriente.

Ante esta situación, para determinar si las potencias de los vatímetros debían **sumarse o restarse**, fue necesario establecer si el ángulo de carga era **menor a 60°** o se encontraba **entre 60° y 90°**.

Para ello, se desconectó la **bobina voltimétrica** del vatímetro con **mayor lectura** (W_1) y se la reconectó en la **fase del vatímetro con menor lectura** (W_2). Si el vatímetro reconectado mostraba una **deflexión positiva**, se concluía que el ángulo de carga era **menor a 60°**, y por lo tanto las potencias de ambos vatímetros debían **sumarse**. En cambio, si la deflexión era **negativa**, se trataba de un ángulo **mayor a 60°**, y las potencias debían **restarse**.

En nuestro caso, al realizar esta prueba, se observó una **deflexión positiva**, lo que confirmó que el ángulo era **inferior a 60°**, por lo tanto, se procedió a **sumar los valores de ambos vatímetros** para obtener la potencia activa total de la carga.

Carga RC

Posteriormente, se conectaron el **banco resistivo (R)** y el **banco de capacitores (C)**, formando una carga **RC**. En esta configuración, tal como se espera teóricamente, se observó que $W_1 < W_2$. Esto se debe a que el sistema ahora presenta un **ángulo de desfase negativo**.

Es importante notar que, si ante una configuración RC se observan **lecturas iguales** en ambos vatímetros ($W_1 = W_2$), esto implicaría que la parte resistiva de la carga es **nula** ($R = 0$), que el desfase es máximo (-90°) y que tenemos una carga **puramente capacitiva**.

Para comprobar este comportamiento, se realizó una prueba **aumentando** progresivamente la **capacidad** del banco, manteniendo constante el valor de R.

Se observó que, a medida que se incrementa la capacidad, la **diferencia** entre las lecturas de los **vatímetros aumentaba**, es decir, $|W_1 - W_2|$ crecía. Esto indica que la componente reactiva predominaba cada vez más y que el ángulo de carga se desplazaba hacia valores más negativos.

Teóricamente, si se continuará aumentando indefinidamente la capacidad (o si se anulara R), el valor de $W_1 - W_2$ tendería a **0**, es decir un desfase de **-90°**: Propio de una carga **puramente capacitiva**.

Datos y cálculos

Carga R-L

Del circuito se deduce que la potencia de la carga es la potencia medida por los vatímetros a los cuales se tienen que restar las potencias pérdidas en las resistencias de los voltímetros así como en las bobinas voltimétricas de los vatímetros:

$$P_C = P_m - P_V - P_{VW} = P_m - U^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{VW1}} + \frac{1}{R_{VW2}} + \frac{1}{R_{V1}} + \frac{1}{R_{V2}} \right)$$

Tenemos que

$$P_m = K_{T1} \cdot W_1 + K_{T2} \cdot W_2$$

Como

$$K_{T1} = K_{T2} \Rightarrow P_m = K_T \cdot (W_1 + W_2)$$

Pero también

$$R_{VW1} = R_{VW2} \text{ y } R_{V1} = R_{V2}$$

Entonces

$$P_C = K_T \cdot (W_1 + W_2) - 2 \cdot U^2 \cdot \left(\frac{1}{R_{VW}} + \frac{1}{R_V} \right)$$

Si se toma $A = K_T \cdot (W_1 + W_2)$, después de aplicar el método del logaritmo se obtiene:

$$e_{A\%} = \frac{1}{W_1 + W_2} (W_1 \cdot e_{W1\%} + W_2 \cdot e_{W2\%})$$

Donde

$$e_{W\%} = e_{Cl W\%} + e_{Ap W\%} + e_{\alpha W\%} + e_{\alpha TI\%} + e_{K TI\%}$$

Con

$$\rightarrow e_{\alpha\%W} = \frac{W \cdot L_W}{R_{VW}} \cdot Tg(\phi'). 100$$

$$\rightarrow e_{\alpha\%TI} = \frac{\beta(Red)}{180.60} \cdot Tg(\phi). 100$$

→ ϕ' : ángulo entre la tensión y la corriente en el vatímetro

→ ϕ : ángulo entre la tensión y la corriente en la carga

→ β : Expresado en minutos

$$\text{Para } W_1 \rightarrow \phi' = 30 - \phi$$

$$\text{Para } W_2 \rightarrow \phi' = 30 + \phi$$

Tenemos el error de potencia $P_c = A - B$ después de aplicar el método del logaritmo se obtiene:

$$e_{PC\%} = \frac{1}{A-B} (A \cdot e_{A\%} + B \cdot e_{B\%})$$

A fin de simplificar el desarrollo de los errores solo se tomará en cuenta el error de término A es decir que tomamos $B = 0$:

$$e_{PC\%} = \frac{1}{A} (A \cdot e_{A\%})$$

Valores	Carga R-L
W_1	$50,5 \text{ div} \cdot \frac{2400W}{120 \text{ div}} = 1010 W$
W_2	$34,4 \text{ div} \cdot \frac{2400W}{120 \text{ div}} = 688 W$
P_m	$(W_1 + W_2) \cdot K_T = 3396 W$
$V_{1,2,3}$	$37 \text{ div} \cdot \frac{480 V}{48 \text{ div}} + 40V = 410V$
$A_{1,2,3}$	$25 \cdot \frac{5 A}{60 \text{ div}} + 1A = 3 A$
R_V	$40 K\Omega$ (Dato constructor)
R_{VW}	$\frac{480 V \cdot 550 \Omega}{3 V} = 88 K\Omega$

P_{carga}	$3396 - 2 \cdot 410^2 \cdot \left(\frac{1}{40 K\Omega} + \frac{1}{88 k\Omega} \right) = 3383,77W$
Q_{carga}	$\sqrt{3} \cdot (W_1 - W_2) \cdot K_T = 1115,44 VAR$
S	$\sqrt{P_c^2 + Q^2} = 3562,88 VA$
ϕ	$Tg^{-1}\left(\frac{Q_c}{P_c}\right) = 18,24^\circ$
F.P	$cos(18,24^\circ) = 0,95$
Z	$\frac{S}{3 \cdot I_L^2} = 32,99 \Omega$
X	$Z \cdot sen\phi = 10,33 \Omega$
R	$Z \cdot cos\phi = 31,33 \Omega$

Errores	Vatimetro 1	Errores	Vatimetro 2
$I_{\%}$	$\frac{I_{Sec}}{I_{Prim}} = \frac{3A}{5A} = 0,6$	$I_{\%}$	$\frac{I_{Sec}}{I_{Prim}} = \frac{3A}{5A} = 0,6$
$e_{CI\%W}$	$C \cdot \frac{X_f}{X_m} = 0,5 \cdot \frac{2400W}{1010W} = 1,19\%$	$e_{CI\%W}$	$C \cdot \frac{X_f}{X_m} = 0,5 \cdot \frac{2400W}{688W} = 3,488\%$
$e_{Ap\%W}$	$\frac{Ap}{div} \cdot 100 = \frac{0,2}{50,5} \cdot 100 = 0,396\%$	$e_{Ap\%W}$	$\frac{Ap}{div} \cdot 100 = \frac{0,2}{34,4} \cdot 100 = 0,581\%$
$e_{\alpha\%W}$	$\frac{2\pi \cdot 50Hz \cdot 10mH}{88K \Omega} \cdot Tg(48,24^\circ) \cdot 100 = 0,004\%$	$e_{\alpha\%W}$	$\frac{2\pi \cdot 50Hz \cdot 10mH}{88K \Omega} \cdot Tg(-11,76^\circ) \cdot 100 = 0,00074\%$
$e_{R\%TI}$	0,2752%	$e_{R\%TI}$	0,2752%
$e_{\alpha\%TI}$	$\frac{12,55}{180,60} \cdot Tg(18,24^\circ) \cdot 100 = 0,038\%$	$e_{\alpha\%TI}$	$\frac{12,55}{180,60} \cdot Tg(18,24^\circ) \cdot 100 = 0,038\%$
$e_{w1\%}$	1,9%	$e_{w2\%}$	4,383%

$$A = K_T \cdot (W_1 + W_2) = 2 \cdot (1010 W + 688 W) = 3396 W$$

$$e_{A\%} = \frac{1}{W_1 + W_2} (W_1 \cdot e_{W1\%} + W_2 \cdot e_{W2\%}) = \frac{1}{1010 + 688} (1010 \cdot 1,9 + 688 \cdot 4,383)$$

$$e_{A\%} = \mathbf{2,906\%}$$

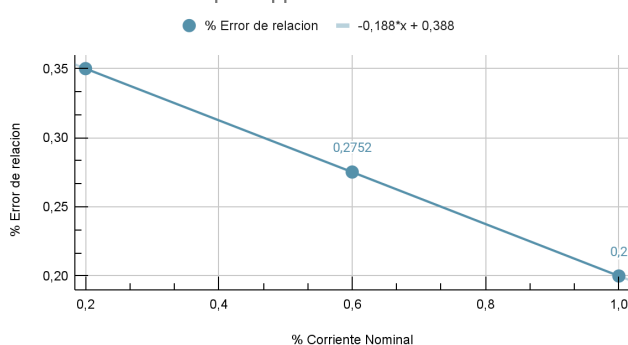
$$e_{PC\%} = \frac{1}{A} (A \cdot e_{A\%}) = \frac{1}{3396 W} (3396 W \cdot 2,906)$$

$$e_{PC\%} = \mathbf{2,9\%}$$

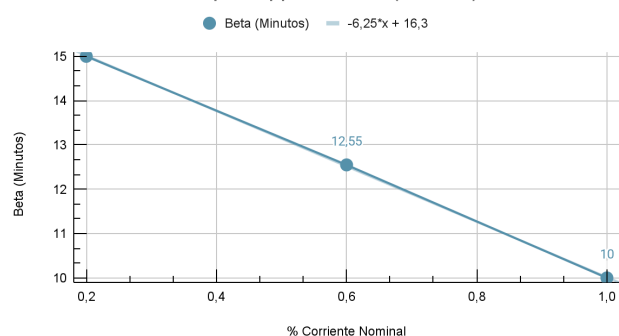
Para encontrar el error de relación y el error de ángulo del TI, se usa la tabla provista por el constructor y se construye para cada error, una gráfica en función los valores de corriente expresados en % de la corriente nominal.

Se encuentran las ecuaciones de los errores con regresión lineal y se encuentra el valor exacto de los errores buscados.

% Corriente Nominal par rapport à % Error de relacion



% Corriente Nominal par rapport à Beta (Minutos)



Resultados y conclusión

A lo largo del trabajo práctico se realizó la medición y el cálculo de **potencia activa, reactiva y aparente** en sistemas trifásicos equilibrados de tres hilos utilizando el **método de Aron**, con transformadores de corriente e instrumentos analógicos.

$$P_c = 3396 \text{ W} \pm 2,9\%$$

$$P_c = (3396 \pm 99) \text{ W}$$

Se comprobó el **comportamiento esperado de los vatímetros** frente a distintas configuraciones de carga:

- En cargas **puramente resistivas**, ambos vatímetros entregaron la **misma lectura**, verificando que el desfase era nulo.
- Con cargas **RL**, se obtuvo $W1 > W2$, y mediante el procedimiento de inversión de bobina voltimétrica se confirmó que el ángulo era **menor a 60°**, por lo que las potencias debían **sumarse**.
- En configuraciones **RC**, se observó $W1 < W2$, como es esperable por el carácter capacitivo de la carga. Además, se verificó que al **aumentar la capacidad** del banco de C, el desfase se hacía más negativo y la diferencia entre vatímetros crecía, acercándose al caso de una carga puramente capacitiva.

Se aplicaron las fórmulas correspondientes para el cálculo de la potencia útil consumida por la carga, considerando las pérdidas en los instrumentos. También se calcularon los **errores de medición**, evaluando tanto la exactitud de **clase**, error de **ángulo** como el error del **transformador de corriente**.

El ensayo permitió validar experimentalmente el funcionamiento del método de Aron y comprender en detalle cómo **varían** las lecturas de **potencia** en **función** del **tipo de carga** y el **ángulo de desfase**.

Referencias

- Apuntes de cátedra, Medidas Eléctricas, UNSE.