

## Determinación del voltaje de trabajo de las cadenas de arranque de los reactores nucleares RP-0 y RP-10

Agustín Zúñiga<sup>1,\*</sup>, Emilio Veramendi, Alberto Salazar

Dirección de Producción, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

### Resumen

En el artículo presentamos la determinación de la curva de voltaje de las cadenas de arranque de los reactores nucleares RP-0 y RP-10, como una propuesta para obtener los voltajes de trabajo. El método consistió en variar el voltaje y registrar el conteo correspondiente. Luego, según la característica del detector se determinó la zona de mejor respuesta, así encontramos que para el reactor RP-0 su respuesta está en la región proporcional, mientras que para el reactor RP-10 su respuesta corresponde a la región de cámaras de ionización. Los valores obtenidos fueron: BF3-A3 (RP-0) 1150 voltios y para el RP-10, CF-A1 = 400 voltios, CF-A2 = 400 voltios, CF-A3 = 400 voltios.

### Determination of the working voltage of the RP-0 and RP-10 nuclear reactors starting chains

#### Abstract

This report presents the determination of the voltage curve of the RP-0 and RP-10 nuclear reactor starting chains, as an approach for determining the working voltages. The method consisted in changing the voltage and recording the corresponding counts. Then, the area of the best response was determined according to the detector characteristics, and also was found that for the RP-0, the response was in the proportional region, meanwhile for the RP-10, the response was in the region of ionization chambers. The values obtained were: BF3-A3 (RP-0) and 1150 V for RP-10, CF-A1 = 400 V, CF-A2 = 400 V, CF-A3 = 400 V.

#### 1. Introducción

En un reactor nuclear el manejo y control de la operación, se basa en la detección de neutrones, los instrumentos (detectores) tienen diversas características, en todos los casos se requiere de un medio intermediario que convierte la interacción de un neutrón en una partícula cargada (electrones principalmente) [1,2].

Para la colección de estas cargas se requiere de un adecuado voltaje de polarización aplicado a los electrodos. Estos voltajes dependerán del tipo de detector empleado, por ejemplo en el reactor RP-0 se tienen detectores de trifluoruro de boro (BF3) [3] y en el reactor RP-10 cámaras de fisión (CF) [4].

En este trabajo determinaremos las curvas de voltaje y a partir de ellas sugeriremos los voltajes de trabajo más convenientes. Estas experiencias se están realizando después de casi 25 años, desde la primera puesta a crítico del RP-10 (30-11-1988), debido a que actualmente se está construyendo un programa de experimentos en física de

reactores, frente al próximo cambio de elementos combustibles del RP-10, de óxidos de uranio a siliciuros de uranio [5].

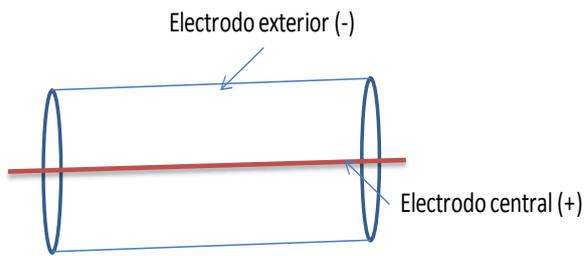
#### 2. El voltaje de trabajo

Se sabe que muchos de los instrumentos dedicados a la detección de radiaciones nucleares se basan en el comportamiento de los pares iónicos formados por las partículas ionizantes a su paso a través de un gas sometido a un campo eléctrico. Este comportamiento varía con el gradiente de potencial del campo eléctrico, generalmente el hilo central es el electrodo positivo (ánodo) y el cilindro externo el electrodo negativo (cátodo), de modo que los electrones son atraídos por el primero y los iones positivos por el segundo (Figura 1).

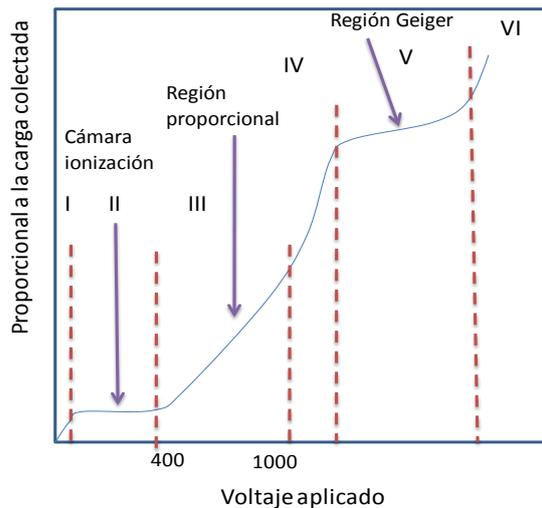
Así, se puede entender, que el valor colectado de la carga por los electrodos dependerá del voltaje aplicado. El carácter general de esta variación se representa en la Figura 2.

---

\* Correspondencia autor: azuniga@ipen.gob.pe



**Figura 1.** Esquema de un detector donde el campo eléctrico permite la colección de la carga producida por el paso de las radiaciones.



**Figura 2.** Variación del conteo (proporcional a la carga colectada) con el voltaje aplicado. Se destacan las regiones de cámara de ionización, región proporcional y región Geiger.

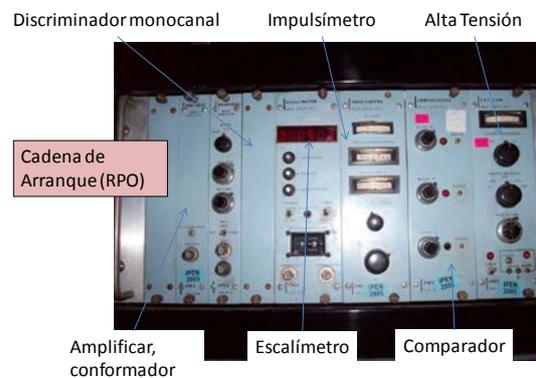
En ella se puede ver que a tensiones muy bajas, la carga colectada aumenta al principio con el voltaje aplicado (región I) y alcanza luego un valor constante (región II). En la primera región al aumentar el voltaje, las partículas cargadas se desplazan más rápidamente, disminuyendo el grado de recombinación y aumentando la carga colectada. Sin embargo, si llega a la segunda región, el aumento de voltaje no incrementa ya el número de pares iónicos colectados, esta es la región de cámara de ionización. Este tiene un rango limitado, si se aumenta el voltaje aparecerá la región III, donde la cantidad de carga colectada para una cierta cantidad de radiación es mayor que la que corresponde a la ionización original, pero proporcional a ella, esto da origen al nombre de región de Proporcionalidad. Considerando que la radiación gamma está presente en los reactores (desde las reacciones de fisión) y puede ser muy intensa, entonces aquellos medidores que siguen el flujo neutrónico deben tener determinadas condiciones para

eliminar esta radiación gamma y centrar su atención a los neutrones, esto se hace mediante las cámaras de ionización compensada [1].

Estos detectores tienen una característica curva de voltaje, y consecuentemente un determinado voltaje de trabajo, en cuyo valor el detector tendrá un mejor desempeño y se conservará más tiempo. Entonces se espera que las cámaras de ionización presenten mesetas y los contadores proporcionales pendientes notorias, la regla que se recomienda para el primer caso, es escoger el voltaje de trabajo que esté lejos de los codos (pueden ser 50 voltios) y para el segundo la región de mayor estabilidad del factor de multiplicación, en ambos casos se trata de estar protegidos de posibles fluctuaciones del voltaje.

### 3. Desarrollo experimental

Los dispositivos electrónicos que constituyen la cadena de arranque en los dos reactores son: el detector, alta tensión, preamplificador, amplificador-conformador, discriminador, impulsímetro, escalímetro, que se muestran en la Figura 3.



**Figura 3.** Módulos de la cadena de arranque del reactor RP-0 desde mesa de control.

El procedimiento experimental seguido fue el siguiente:<sup>†</sup>

- Se aseguró que la cadena nuclear del reactor para el arranque esté en condiciones óptimas de operatividad.
- Se eligió la cadena de arranque a ser estudiada.
- El reactor se puso a crítico para una

<sup>†</sup> Nota: Es recomendable que no se alcancen extremos del voltaje de alta tensión, con fines de protección del detector.

población neutrónica de 3000 cuentas por segundo.

d) Para facilitar la toma de datos se incrementó en el escalímetro el intervalo de tiempo de colección (de 1 segundo para 2 segundos).

e) Se puso a cero voltios el módulo de alta tensión de la cadena escogida.

f) Se registró el contejo correspondiente al voltaje establecido. Se tomaron tres contejos.

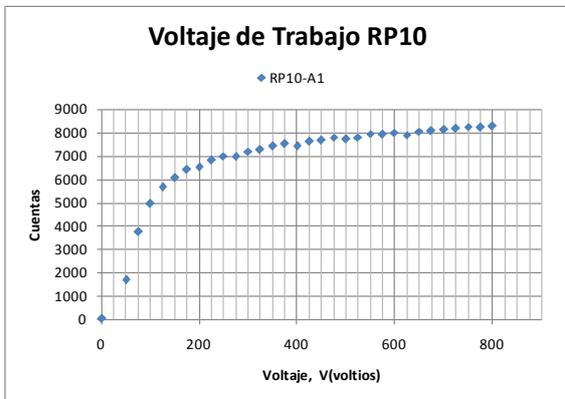
g) Se incrementó el voltaje desde el módulo de alta tensión en 50 voltios para el reactor RP-0 y en 25 voltios para el reactor RP-10.

h) Cuando se alcanzó 800 voltios para el reactor RP-0 y 1800 voltios para el RP-10 se suspendió el experimento.

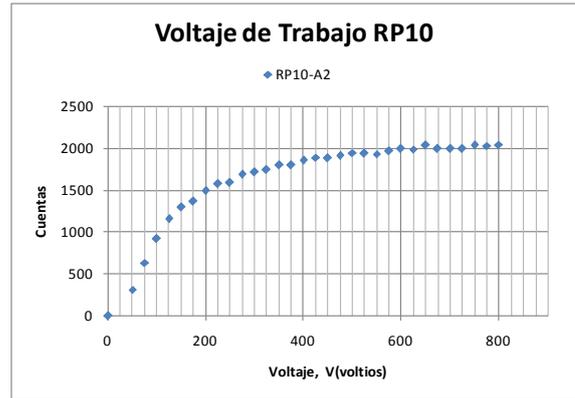
### 4. Resultados

#### 4.1. Visualización de datos

Los datos obtenidos son contejos por cada segundo, se registraron tres contejos y se graficó el valor promedio. Para el error se asumió la distribución de Poisson. En las Tablas 1, 2 y 3 y las Figuras 4, 5 y 6 se presentan los datos para el reactor RP-10.



**Figura 4.** Representación de los datos obtenidos durante el experimento, para el caso del detector, cámara de fisión arranque 1, CF1(RP-10).



**Figura 5.** Representación de los datos obtenidos durante el experimento, para el caso del detector, cámara de fisión arranque 2, CF2(RP10).

**Tabla 1.** Resultados de la medición, para la cadena de arranque 1, CF1(RP-10).

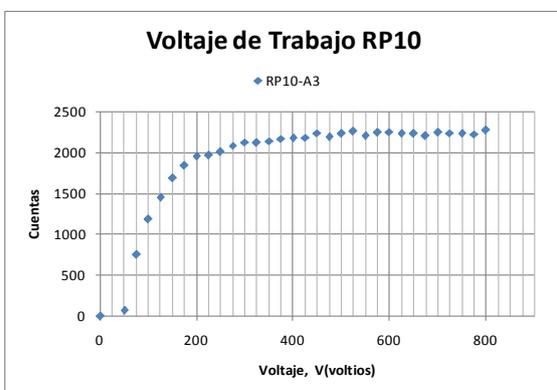
Voltaje	Contaje			<C>	Error
0	14	28	28	23	5
50	1632	1712	1694	1679	41
75	3729	3780	3754	3754	61
100	4928	4998	4938	4955	70
125	5664	5653	5718	5678	75
150	6031	6108	6060	6066	78
175	6497	6359	6371	6409	80
200	6445	6507	6627	6526	81
225	6792	6858	6783	6811	83
250	6886	7045	7029	6987	84
275	6909	7057	6945	6970	83
300	7159	7147	7262	7189	85
325	7246	7393	7186	7275	85
350	7340	7465	7448	7418	86
375	7601	7539	7432	7524	87
400	7328	7421	7485	7411	86
425	7712	7655	7472	7613	87
450	7682	7589	7732	7668	88
475	7933	7788	7657	7793	88
500	7837	7619	7700	7719	88
525	7866	7833	7688	7796	88
550	7876	7954	7994	7941	89
575	7969	7909	7896	7925	89
600	7911	8059	8032	8001	89
625	8081	7903	7686	7890	89
650	8076	8058	7998	8044	90
675	8070	8124	7978	8057	90
700	8212	8017	8104	8111	90
725	8261	8054	8248	8188	90
750	8198	8212	8317	8242	91
775	8219	8176	8257	8217	91
800	8294	8278	8294	8289	91

**Tabla 2.** Resultados de la medición, para la cadena de arranque 2, CF2 (RP-10).

Voltaje	Contaje			<C>	Error
0	0	0	0	0	0
50	396	397	390	308	18
75	860	784	806	631	25
100	1267	1125	1185	919	30
125	1490	1495	1517	1157	34
150	1772	1611	1637	1293	36
175	1775	1777	1739	1367	37
200	1949	1938	1880	1492	39
225	1972	2069	2040	1577	40
250	2003	2026	2053	1583	40
275	2115	2181	2166	1684	41
300	2145	2224	2179	1712	41
325	2135	2265	2235	1740	42
350	2345	2233	2250	1795	42
375	2323	2222	2283	1801	42
400	2351	2331	2325	1852	43
425	2369	2399	2362	1889	43
450	2405	2378	2275	1877	43
475	2388	2374	2411	1912	44
500	2412	2439	2423	1944	44
525	2477	2411	2346	1940	44
550	2470	2385	2313	1930	44
575	2378	2419	2476	1962	44
600	2461	2454	2446	1990	45
625	2409	2506	2389	1982	45
650	2473	2547	2456	2032	45
675	2446	2474	2382	1994	45
700	2419	2445	2397	1990	45
725	2402	2373	2449	1987	45
750	2478	2467	2440	2034	45
775	2414	2477	2443	2027	45
800	2442	2463	2448	2038	45

**Tabla 3.** Resultados de la medición, para la cadena de arranque 3, CF3 (RP-10).

Voltaje	Contaje			<C>	Error
0	0	0	0	0	0
50	75	64	47	62	8
75	761	768	720	750	27
100	1225	1160	1150	1178	34
125	1429	1446	1475	1450	38
150	1754	1620	1668	1681	41
175	1838	1873	1796	1836	43
200	1903	1997	1944	1948	44
225	2017	1983	1895	1965	44
250	2008	2057	1962	2009	45
275	2090	2076	2085	2084	46
300	2122	2163	2085	2123	46
325	2156	2060	2148	2121	46
350	2111	2173	2125	2136	46
375	2207	2128	2169	2168	47
400	2185	2184	2159	2176	47
425	2146	2218	2174	2179	47
450	2201	2263	2237	2234	47
475	2204	2073	2288	2188	47
500	2186	2208	2284	2226	47
525	2278	2252	2231	2254	47
550	2211	2191	2188	2197	47
575	2311	2218	2211	2247	47
600	2290	2226	2230	2249	47
625	2215	2193	2274	2227	47
650	2238	2151	2285	2225	47
675	2180	2157	2265	2201	47
700	2266	2192	2262	2240	47
725	2230	2198	2283	2237	47
750	2247	2198	2239	2228	47
775	2250	2126	2288	2221	47
800	2242	2281	2295	2273	48

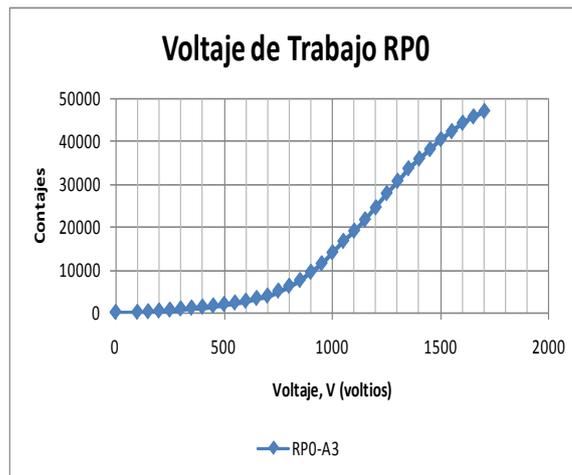


**Figura 6.** Representación de los datos obtenidos durante el experimento, para el caso del detector, cámara de fisión arranque 3, CF3(RP-10).

De manera similar, para el reactor RP-0, se hizo el registro para la cadena de arranque 3, tal como se demuestra en la Tabla 4 y Figura 7.

**Tabla 4.** Resultados de la medición, para la cadena de arranque 3, BF3-A3 (RP-0).

Voltaje (V)	Contaje						<C>	Error
0	0	0	0	0	0	0	0	
100	20	30	26	22	28	25	5	
150	161	153	168	125	173	156	12	
200	291	341	319	366	316	327	18	
250	545	530	519	561	540	539	23	
300	791	833	769	826	819	808	28	
350	1017	1020	993	979	1047	1011	32	
400	1262	1194	1209	1245	1293	1241	35	
450	1486	1540	1439	1464	1555	1497	39	
500	1861	1876	1808	1925	1878	1870	43	
550	2195	2185	2247	2187	2195	2202	47	
600	2608	2542	2588	2719	2681	2628	51	
650	3193	3352	3270	3285	3190	3258	57	
700	3985	3966	3954	3969	3245	3824	62	
750	4983	4955	4919	5028	5025	4982	71	
800	6137	6018	6126	6152	6162	6119	78	
850	7418	7559	7419	7439	7462	7459	86	
900	9427	9337	9403	9310	9374	9370	97	
950	11282	11191	11601	11130	11632	11367	107	
1000	13815	13836	14092	13965	13984	13938	118	
1050	16584	16709	16524	16709	16411	16587	129	
1100	19070	19003	19102	18704	19091	18994	138	
1150	21820	21863	21717	21170	21530	21620	147	
1200	23329	24764	24665	24891	24497	24429	156	
1250	27618	27727	27922	27768	27726	27752	167	
1300	30929	30889	30557	30373	30425	30635	175	
1350	33516	33761	33720	33502	33383	33576	183	
1400	35789	35813	35940	35883	35759	35837	189	
1450	37365	38238	38293	38249	38094	38048	195	
1500	40293	40456	40376	40318	40448	40378	201	
1550	42323	42337	42192	42222	42153	42245	206	
1600	44060	44362	44259	44179	44149	44202	210	
1650	45656	45550	45726	45769	45768	45694	214	
1700	47117	46979	46817	46822	46985	46944	217	



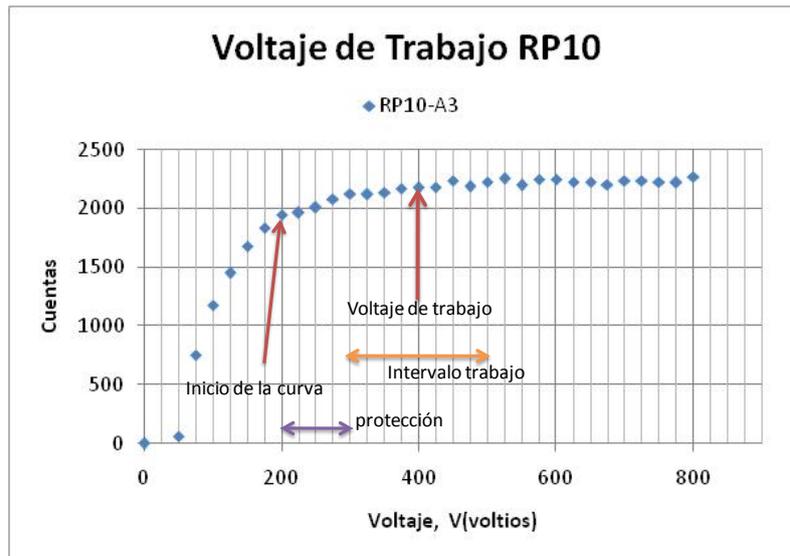
**Figura 7.** Representación de los datos obtenidos durante el experimento, para el caso del detector, proporcional arranque 3, BF3-A3 (RP-0).

4.2. *Análisis de datos*

Para la determinación de los voltajes de trabajo consideramos los criterios siguientes:

- Identificar el voltaje de inicio de la curva
- Identificar un intervalo de protección (unos 50 a 100 voltios).
- Identificar el intervalo de trabajo (unos 100 a 400 voltios).
- Identificar el voltaje de trabajo (a la mitad del intervalo de trabajo).

Estos pasos se representan en la Figura 8, a modo de ejemplo y usando los resultados de Tabla 3.



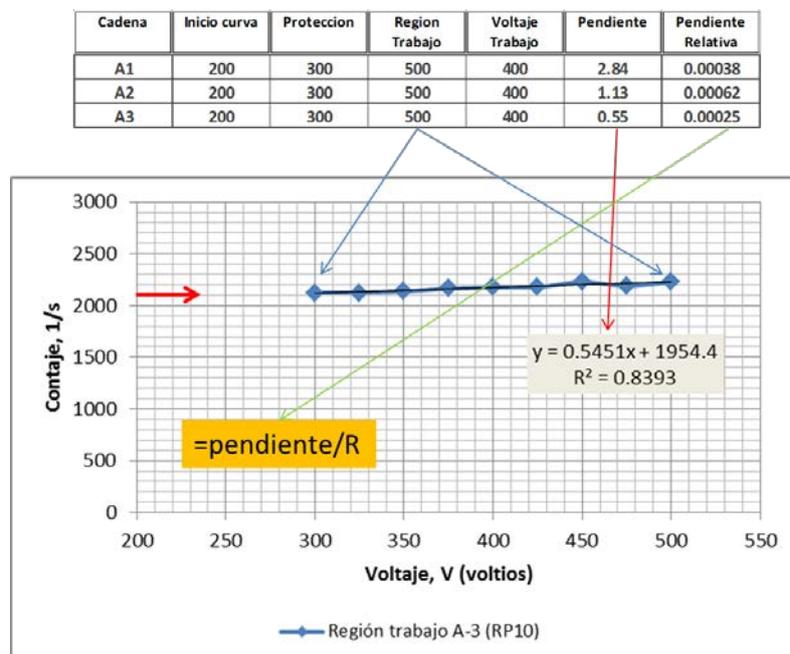
**Figura 8.** Esquema de identificación del voltaje de trabajo para la cadena de arranque 3, CFA3(RP-10).

Utilizando el esquema de la Figura 8, los resultados comparativos para las cadenas de arranque del reactor RP-10 se presentan en la Tabla 5. Donde la pendiente corresponde a la recta ajustada de la región de trabajo que la hemos escogido de 200 voltios (entre 300 a

500), la pendiente relativa, corresponde al cociente entre la pendiente y el conteaje promedio (R) de la región de trabajo, como se ve en la Figura 9.

**Tabla 5.** Resultados comparativos de las características de las curvas de trabajo de las cadenas de arranque del RP-10.

Cadena	Inicio curva	Protección	Región Trabajo	Voltaje Trabajo	Pendiente	Pendiente Relativa
A1	200	300	500	400	2.84	0.00038
A2	200	300	500	400	1.13	0.00062
A3	200	300	500	400	0.55	0.00025



**Figura 9.** Esquema de identificación de la región de trabajo y del coeficiente de pendiente relativa.

Las tres curvas de voltaje de trabajo para las cadenas de arranque del reactor RP-10 se presentan en la Figura 10.

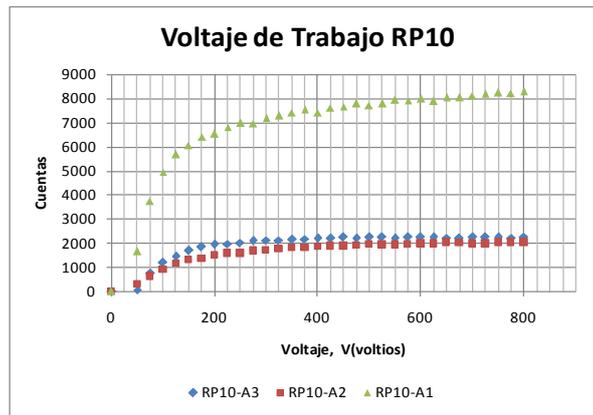


Figura 10. Comparación de las curvas de voltaje para las tres cadenas de arranque del RP-10.

Para el caso de la cadena de arranque A-3 del RP-0, el resultado se presenta en la Tabla 6 y Figura 11.

Tabla 6. Resultados de las características de las curvas de trabajo de las cadena de arranque A-3 del RP-0.

Cadena	Inicio curva	Protección	Región Trabajo	Voltaje Trabajo	Pendiente	Pend. Relativa
A3	900	1000	1300	1150	55.6	0.00025

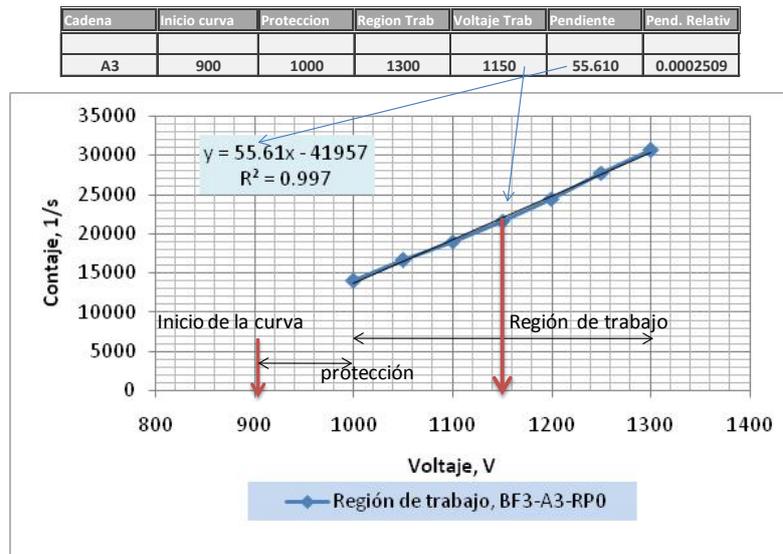


Figura 11. Esquema de identificación de la región de trabajo y del coeficiente de pendiente relativa, para la cadena de arranque A-3, RP-0.

### 5. Conclusiones

Se ha podido identificar las curvas características de voltaje para las cadenas de arranque de los reactores RP-0 y RP-10, que corresponden a los detectores tipo proporcional y cámara de ionización, respectivamente.

Los voltajes de trabajo obtenidos para las cámaras de ionización del reactor RP-10 es

de 400 voltios, el mismo que se viene utilizando actualmente durante las operaciones del mismo. Sin embargo, el que corresponde al reactor RP-0 de acuerdo con los resultados obtenidos, debería ajustarse a 1150 voltios.

De acuerdo con los resultados de las curvas de voltaje de trabajo, el de mayor pendiente resulta el Arranque 1 (A1) para el reactor RP-10 respecto a los otros dos. El más plano

resulta el Arranque 3. Sin embargo, considerando su región diremos que los detectores están en buenas condiciones.

## **6. Referencias**

[1]. Knoll G. Radiation detection and measurement. New York: John Wiley; 1992.  
[2]. Zúñiga A, Veramendi E, *et al.* Determinación del tiempo muerto de la cadena de arranque de un reactor nuclear. Informe Científico Tecnológico. 2008; Volumen 8: 123-130.  
[3]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de Seguridad. Instrumentación y

Control del RP-0. Capítulo 8. Dirección de Producción. Lima: IPEN. 1990. [Informe interno].

[4]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de seguridad del RP-10. Instrumentación y control del RP-10. Capítulo 8. Dirección de Producción. Lima: IPEN. 2014. [Informe interno].

[5]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de seguridad del RP-10. Puesta en servicio del RP-10. Capítulo 15. Dirección de Producción. Lima: IPEN. 2014. [Informe interno].