

“Obtención de hidrógeno y oxígeno por magnetoelectrólisis del agua”.

Proyecto 4.10 - Convocatoria 98-99

Dr. Enrique Brillas Coso; Dra. Elena Krotenko; Sr. Jose Asenjo Martínez

Resumen

Los experimentos del presente trabajo se han centrado en la magnetoelectrólisis del agua. Se trata del estudio de la obtención de hidrógeno y oxígeno a partir de una disolución acuosa alcalina en presencia de un campo magnético externo homogéneo constante. Dicho estudio también se ha efectuado en idénticas condiciones pero sin campo magnético aplicado. Se han determinado la tensión de la celda electrolítica en función de la intensidad de la corriente, y posteriormente en función del tiempo de electrólisis

Los datos obtenidos nos revelan que el efecto de un campo magnético de 0.9 Teslas sobre el proceso de magnetoelectrólisis del agua es real, reproducible y permite un ahorro energético de hasta un 17% en el caso que la densidad de corriente sea aproximadamente 600 mA/cm^2 .

FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ.

Memoria final del proyecto 4.10

Convocatoria 98-99

**“Obtención de hidrógeno y oxígeno por
magneto-electrólisis del agua”.**

Autores:

Dr. Enrique Brillas Coso

Dra. Elena Krotenko

Sr. Jose Asenjo Martínez

Diciembre 1999

Memoria final del proyecto 4.10
Convocatoria 98-99
FUNDACIÓN DOMINGO MARTÍNEZ.
“Obtención de hidrógeno y oxígeno por magnetoelectrólisis del agua”.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN.	3
2.- PREPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS Y MATERIAL UTILIZADO.	5
3.- EXPERIMENTOS PRELIMINARES.	9
4.- ESTUDIOS DEL POTENCIAL EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD.	10
4.1.- EXPERIMENTOS A CAMPO CERO ($H=0$).	10
4.1.1.- Procedimiento experimental.	10
4.1.2.- Datos experimentales.	11
4.1.3.- Estudio de los valores medios.	14
4.2.- EXPERIMENTOS CON CAMPO ANTIPARALELO.	15
4.2.1.- Procedimiento experimental.	15
4.2.2.- Datos experimentales.	16
4.2.3.- Estudio de los valores medios.	19
4.3.- ESTUDIOS COMPARATIVOS.	20

5.- ESTUDIOS DEL POTENCIAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.	23
5.1.- EXPERIMENTOS A CAMPO CERO ($H=0$).	23
5.1.1.- Procedimiento experimental.	23
5.1.2.- Datos experimentales.	24
5.2.- EXPERIMENTOS CON CAMPO ANTIPARALELO.	28
5.2.1.- Procedimiento experimental.	28
5.2.2.- Datos experimentales.	28
5.3.- ESTUDIOS COMPARATIVOS.	35
6.- EXPERIMENTOS CON VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO APLICADO.	40
7.- CONCLUSIONES.	42

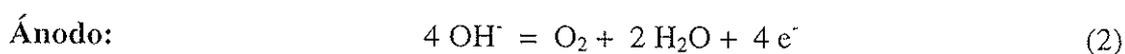
1.- INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo, consiste en optimizar el proceso de obtención de oxígeno e hidrógeno por medio de la electrólisis del agua en una disolución alcalina, aplicando un campo magnético externo (magneto-electrólisis).

La electrólisis del agua es un proceso conocido desde hace décadas e incluso utilizado industrialmente durante aproximadamente un siglo. A pesar de la gran variedad de métodos alternativos desarrollados posteriormente para producir hidrógeno y oxígeno, la electrólisis en medio acuoso sigue teniendo una gran importancia tanto por la pureza de los productos resultantes (a partir del 99.8 % para el H₂ y el 99.6 % para el O₂), como por razones de carácter ambiental.

Es importante destacar, que la electrólisis del agua forma parte un ciclo cerrado sin componentes tóxicos: el agua es la fuente de hidrógeno más abundante, y el uso de hidrógeno como combustible produce nuevamente agua. Pero actualmente, el uso de procesos de electrólisis es bastante restringido ya que su coste energético es demasiado elevado en comparación con otros métodos (técnicas de separación del oxígeno del aire y *cracking* de hidrocarburos para obtener hidrógeno). Recordemos, que en España, al igual que en otros países, todavía existen instalaciones para llevar a cabo este proceso. Así pues, la optimización de la electrólisis del agua tiene interés científico, técnico, económico y medioambiental .

Las reacciones que se producen en los electrodos durante nuestros ensayos electrolíticos son las siguientes:



La reacción total es la siguiente:



Durante los ensayos realizados la celda electrolítica trabajaba como una pila forzada. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo consistía en disminuir el coste energético del proceso. Recordemos que en general, el campo magnético externo tiene influencia:

a) sobre el movimiento colectivo de los portadores de carga (en nuestro caso, de radicales OH⁻, electrones, y una pequeña cantidad de protones) debido a la fuerza de Lorentz;

b) sobre las reacciones químicas en la celda (que en nuestro caso consistían en las reacciones electródicas (1) y (2)).

Durante este proyecto, fueron realizados estudios del comportamiento de la tensión entre los electrodos de la celda, en función de la intensidad de la corriente eléctrica I (A) y también en función del tiempo t (min) transcurrido desde el inicio de la electrólisis. Ambos casos fueron investigados tanto en ausencia como en presencia de campo magnético externo. Debido a ello, los datos aportados se basarán en comparaciones entre valores de voltaje con campo magnético y sin campo magnético aplicado.

2.- PREPARACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS Y MATERIAL UTILIZADO

El material utilizado durante el proyecto ha sido el siguiente:

- a) disoluciones 6 M de KOH
- b) imán circular de 0.9 Teslas
- c) celda electrolítica
- d) fuente de tensión
- e) multímetro
- f) pinzas y cables

Para las disoluciones de 6M de KOH hicimos uso del material suministrado por Panreac Química S.A., de grado purísimo.

En los experimentos en los que aplicábamos campo magnético, lo hacíamos con un imán circular modelo PM-900-45 de la empresa Magnetic Solutions LTD. En la figura 1 podemos apreciar el modelo descrito. Dicho imán aplica un campo magnético paralelo en su interior, tal y como se puede observar en la figura 2. La intensidad del campo magnético es de 0.9 Teslas y el diámetro interior es de 45 mm.

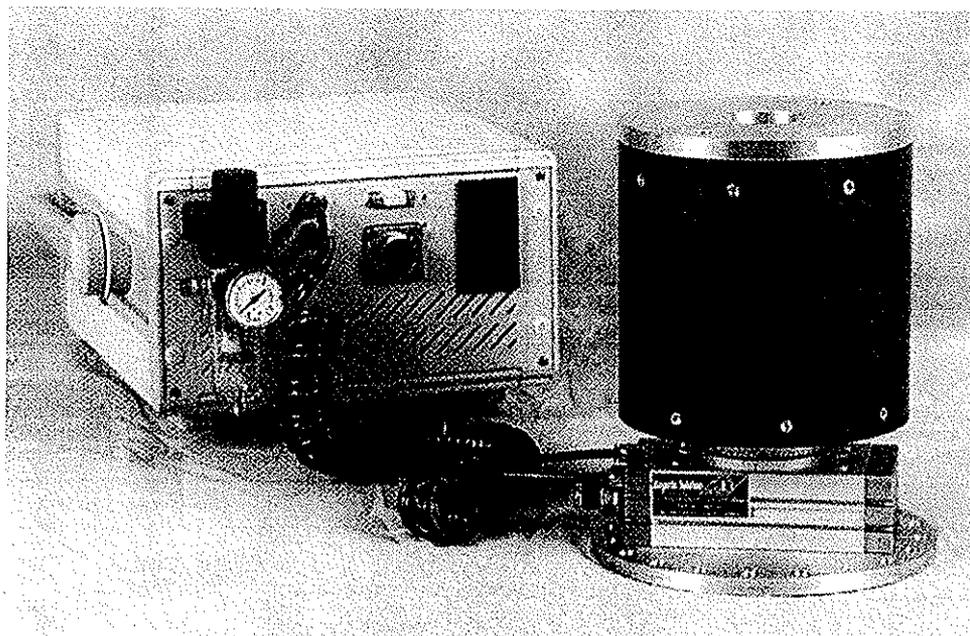


Figura 1

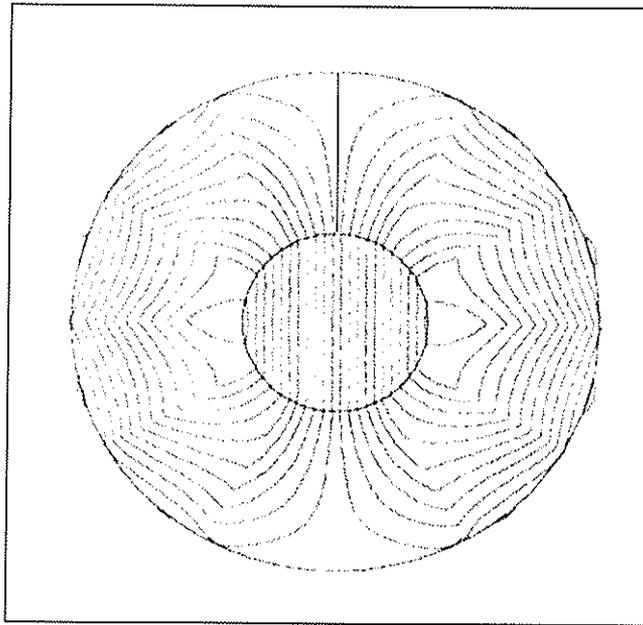


Figura 2

Para el suministro de corriente hemos hecho uso de una fuente de alimentación DC de la empresa Hewlett Packard. En concreto fue utilizado el modelo 6545-A cuyas características muestran unos intervalos de trabajo para tensiones entre 0 y 120 voltios, y para corrientes entre 0 y 1.5 amperios.

Para tomar medidas de tensión con un poco más de precisión hemos hecho uso de un multímetro Schlumberger, modelo Solartron 7055. Este hecho ha sido debido a que la propia fuente de alimentación solamente mostraba dos cifras decimales para la tensión, lo cual considerábamos insuficiente para controlar la estabilidad de nuestros experimentos.

Las electrólisis han sido realizadas en una celda un poco especial. Tenía que tener unas dimensiones concretas, determinadas por el diámetro y la altura del imán donde iba a ser colocada en las pruebas con campo magnético aplicado. Aproximadamente tiene 165 mm de alto por 45 mm de diámetro en su sección transversal. Dicha celda es de vidrio PIREX. Mostramos en la figura 3 un dibujo de la forma de dicha celda así como la situación de los electrodos.

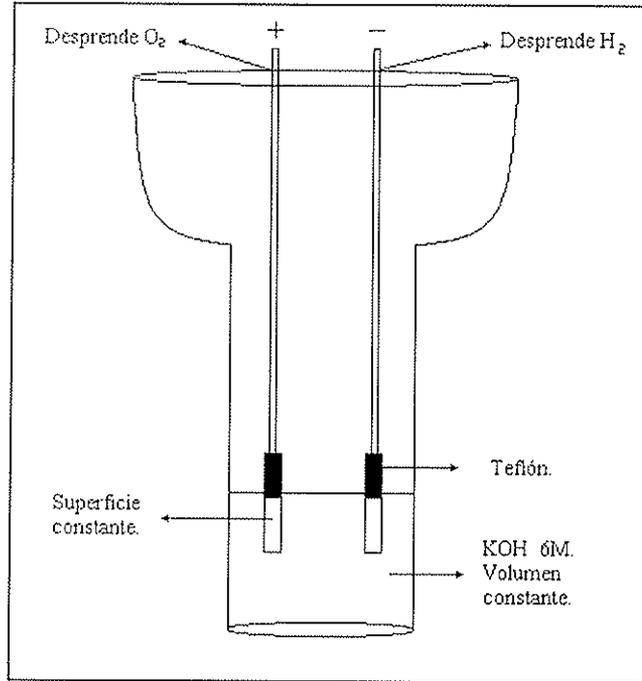


Figura 3

Los electrodos de platino fueron preparados con un cuidado especial. Para poder disminuir al máximo la resistencia óhmica debida a los contactos, fueron soldados los cables de cobre a los respectivos electrodos. De esta manera nos asegurábamos de que no teníamos variaciones en la tensión debida al mal contacto con el conductor. Las superficies de trabajo de los electrodos fueron constantes durante todas las electrólisis realizadas (140 mm^2).

Otro aspecto importante en la preparación de los experimentos fue el control absoluto de la distancia entre electrodos. Para ello construimos una pieza de teflón que una vez colocada entre los electrodos, permitía mantener constante la distancia entre ellos.(Figura 4)

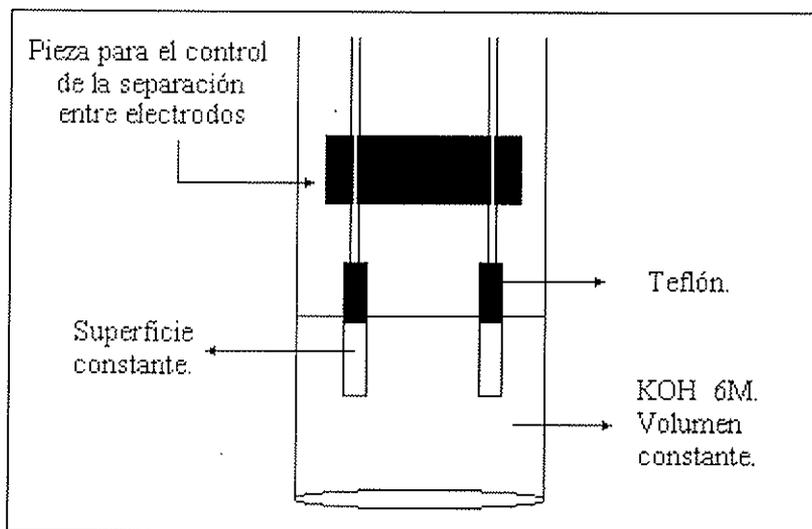


Figura 4

Todas las electrólisis fueron realizadas con el mismo volumen de disolución. En concreto siempre se utilizaron 30 ml de KOH 6M. Dichas disoluciones se preparaban el mismo día que la realización de los ensayos. Con ello evitábamos posibles errores debidos al mal estado de las mismas.

3.- EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Durante las primeras semanas hemos intentado reproducir los experimentos realizados durante el proyecto del año pasado. Los datos obtenidos han sido muy parecidos a los obtenidos en aquel momento. Se han hecho pruebas a campo cero, a campo paralelo y a campo antiparalelo. Para explicar a qué nos referimos cuando hablamos de campo paralelo y antiparalelo observemos las Figuras 5 y 6.

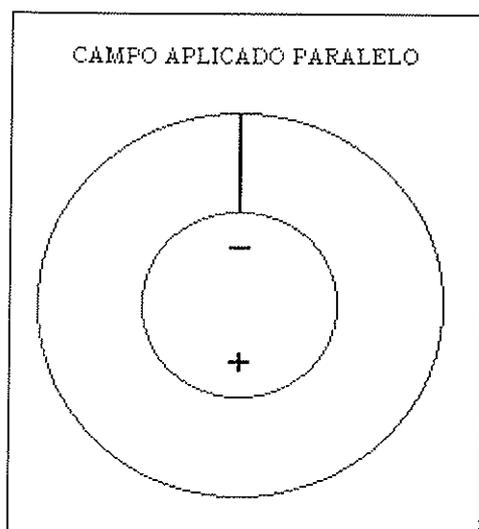


Figura 5

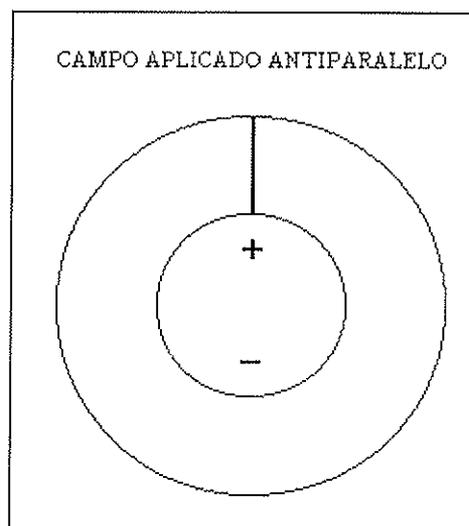


Figura 6

Podemos apreciar que la gran diferencia es debida a la posición de los electrodos respecto al sentido del campo magnético aplicado, y que viene dado por la línea vertical en el imán.

También hemos intentado optimizar al máximo los componentes de trabajo. Para ello conseguimos incorporar un tapón a la celda electrolítica con la función de mantener aislado el medio de la reacción con el exterior. También unimos todas las conexiones por medio de soldaduras para tener así una menor resistencia de contacto, e incorporamos una pieza de teflón para mantener constante la distancia entre electrodos. Gracias a todas estas mejoras, los resultados de los ensayos actuales corresponden a valores de tensión más bajos que los obtenidos durante el año pasado.

4.- ESTUDIO DEL POTENCIAL EN FUNCIÓN DE LA INTENSIDAD.

4.1.- EXPERIMENTOS A CAMPO CERO (H=0)

4.1.1.- Procedimiento experimental.

Al inicio de cada ensayo, teníamos la precaución de limpiar todos los componentes que íbamos a usar. Posteriormente introducimos la disolución de KOH en la celda, seguida de los electrodos de platino. Todo ello bien alejado del imán, para asegurarnos que no habrá influencia del campo magnético externo.

Una vez preparado todo, conectamos los electrodos a la fuente de alimentación y comenzamos las medidas. Consistía en anotar la tensión inmediata y la tensión estable (después de dos minutos) para diferentes intensidades. Para ello comenzábamos a intensidades bajas (0.1 A), e íbamos subiendo hasta 1.5 A a razón de 0.1 A. Es lo que llamamos medidas de tensión inmediata y estable para un barrido de intensidades.

La lectura de las tensiones se efectuaba con un multímetro que nos permitía observar hasta cuatro decimales. De esta manera podíamos decidir si la estabilidad en la reacción era óptima, o por el contrario debíamos esperar un poco más antes de cambiar de valor de la intensidad.

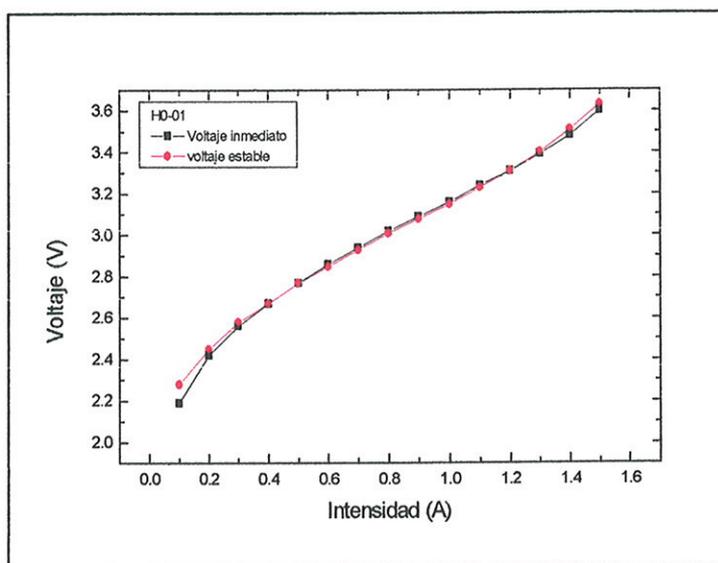
En los resultados que mostraremos a continuación, podemos observar como varía la tensión para un *barrido de intensidades*. Las gráficas nos muestran que dicha variación tiende a saturarse para intensidades altas. En capítulos sucesivos mostraremos los resultados con campo magnético aplicado y las comparativas entre todos ellos.

A todos los ensayos realizados a campo nulo, les hemos asignado las letras H0 además de una numeración posterior. Así pues mostramos a continuación los datos experimentales con las gráficas respectivas de los experimentos: H0-01; H0-02; H0-03; H0-04 y H0-05.

4.1.2.- Datos experimentales

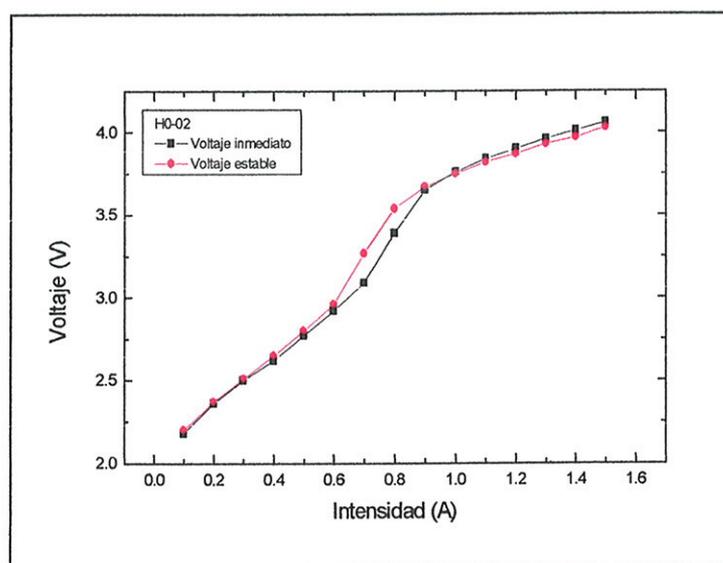
EXP H0-01

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{estable} (V)
0.1	2.19	2.28
0.2	2.42	2.45
0.3	2.56	2.58
0.4	2.67	2.67
0.5	2.77	2.77
0.6	2.86	2.85
0.7	2.94	2.93
0.8	3.02	3.01
0.9	3.09	3.08
1	3.16	3.15
1.1	3.24	3.23
1.2	3.31	3.31
1.3	3.39	3.4
1.4	3.48	3.51
1.5	3.6	3.63



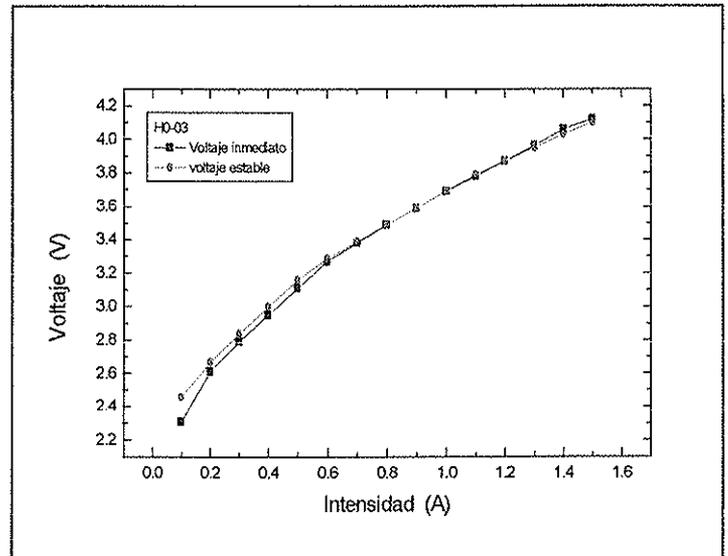
EXP H0-02

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{estable} (V)
0.1	2.18	2.2
0.2	2.36	2.37
0.3	2.5	2.51
0.4	2.62	2.65
0.5	2.77	2.8
0.6	2.92	2.96
0.7	3.09	3.27
0.8	3.39	3.54
0.9	3.65	3.67
1	3.76	3.75
1.1	3.84	3.82
1.2	3.9	3.87
1.3	3.96	3.93
1.4	4.01	3.97
1.5	4.06	4.03



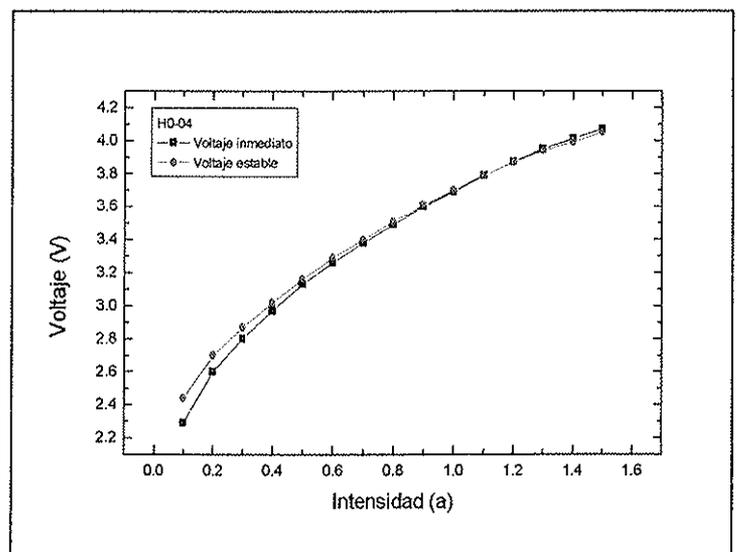
EXP H0-03

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{estable} (V)
0.1	2.31	2.46
0.2	2.61	2.67
0.3	2.79	2.84
0.4	2.95	3
0.5	3.11	3.16
0.6	3.27	3.29
0.7	3.38	3.39
0.8	3.49	3.49
0.9	3.59	3.59
1	3.69	3.69
1.1	3.78	3.79
1.2	3.87	3.87
1.3	3.96	3.95
1.4	4.06	4.03
1.5	4.12	4.1



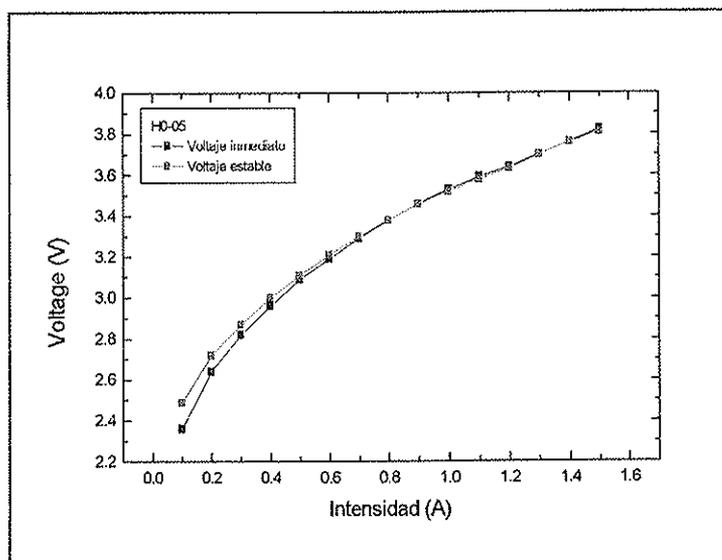
EXP-H0-04

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{estable} (V)
0.1	2.29	2.44
0.2	2.6	2.7
0.3	2.8	2.87
0.4	2.97	3.02
0.5	3.13	3.16
0.6	3.26	3.29
0.7	3.38	3.4
0.8	3.49	3.51
0.9	3.6	3.61
1	3.69	3.7
1.1	3.79	3.79
1.2	3.87	3.87
1.3	3.95	3.94
1.4	4.01	3.99
1.5	4.07	4.05



EXP H0-05

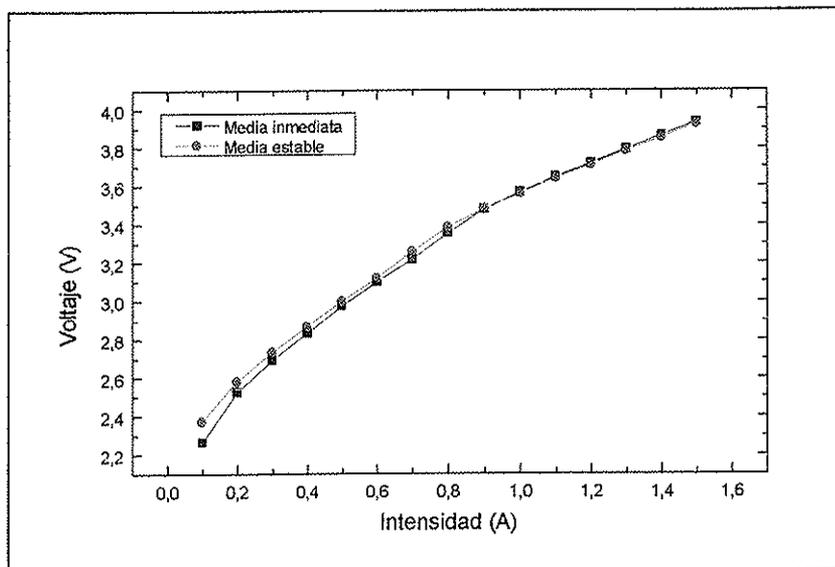
I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{estable} (V)
0.1	2.36	2.49
0.2	2.64	2.72
0.3	2.82	2.87
0.4	2.96	3
0.5	3.09	3.11
0.6	3.19	3.21
0.7	3.29	3.3
0.8	3.38	3.38
0.9	3.46	3.46
1	3.53	3.52
1.1	3.59	3.58
1.2	3.64	3.63
1.3	3.7	3.7
1.4	3.76	3.76
1.5	3.82	3.81



4.1.3.- Estudio de los valores medios.

A continuación presentamos los valores medios aritméticos del potencial inmediato y del potencial estable de los experimentos realizados sin campo magnético aplicado. Dichas medias han sido realizadas para cada valor de intensidad y manteniendo constante la distancia entre electrodos. Posteriormente mostramos graficados todos los datos.

Intensidad (A)	Valores medios	
	V _{inmediato} (V)	V _{estable} (V)
0,1	2,266	2,374
0,2	2,526	2,582
0,3	2,694	2,734
0,4	2,834	2,868
0,5	2,974	3
0,6	3,1	3,12
0,7	3,216	3,258
0,8	3,354	3,386
0,9	3,478	3,482
1	3,566	3,562
1,1	3,648	3,642
1,2	3,718	3,71
1,3	3,792	3,784
1,4	3,864	3,852
1,5	3,934	3,924



4.2.- EXPERIMENTOS CON CAMPO ANTIPARALELO.

4.2.1.- Procedimiento experimental.

Tal y como hacíamos en el caso de los ensayos a campo nulo, todos los componentes que íbamos a utilizar eran limpiados con rigor antes de cada prueba. Las disoluciones eran exactamente iguales y el sistema de proceder también.

En el momento posterior a la conexión de los electrodos, introducíamos la celda en el interior del imán circular. Dicha celda encajaba perfectamente en la abertura del imán pero quedaba un poco holgada, lo cual nos permitía poder girarla en un sentido u otro hasta colocarla en la posición adecuada. Todos los experimentos efectuados con campo aplicado, se efectuaron con lo que hemos denominado campo antiparalelo (ver Figura 6).

Es importante mencionar que mientras la celda está introducida dentro del imán, nosotros perdemos completamente la visibilidad de todo lo que sucede dentro de ella. Por este motivo, hicimos un agujero en la parte superior del tapón de la celda, para poder observar cualquier anomalía que pudiera surgir durante el experimento. Este agujero nos permitía comprobar además, la correcta colocación y separación entre electrodos.

En cuanto al protocolo de medidas, fue efectuado el mismo que en los ensayos a campo nulo. Es decir utilizamos lo que hemos llamado el *barrido de intensidades* para ir anotando los valores de la tensión inmediata y la estable.

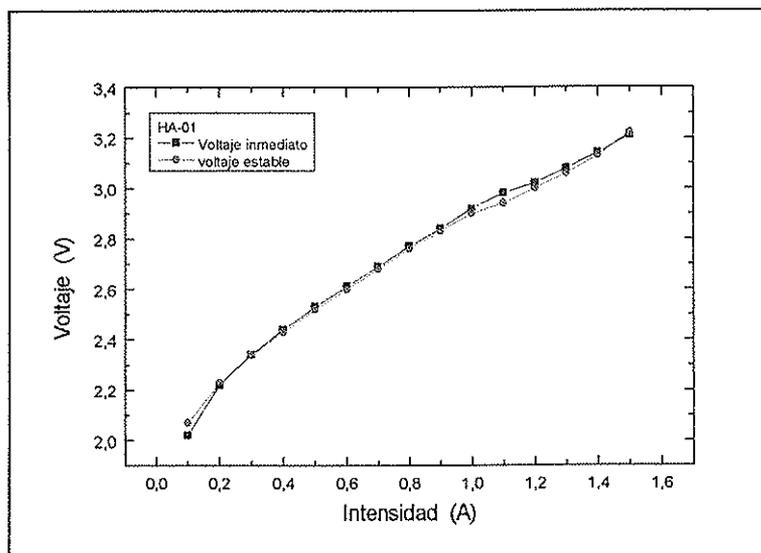
Al igual que anteriormente, las lecturas se efectuaban con un multímetro externo. Recordemos que la fuente de alimentación sólo permitía obtener valores con 1 decimal, y con el multímetro externo podíamos obtener una mayor exactitud en nuestras medidas.

A todos los ensayos realizados a campo antiparalelo, les hemos asignado las letras HA además de una numeración posterior. Así pues mostramos a continuación los datos experimentales con las gráficas respectivas de los experimentos: HA-01; HA-02; HA-03; HA-04 y HA-05. En algún capítulo posterior analizaremos y compararemos todos los datos con campo y sin campo magnético aplicado.

4.2.2.- Datos experimentales

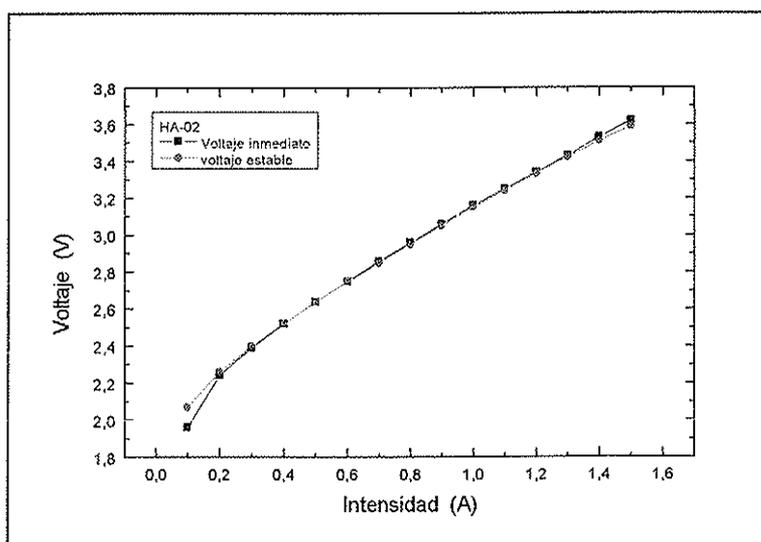
EXP HA-01

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{est.} (V)
0,1	2,02	2,07
0,2	2,22	2,23
0,3	2,34	2,34
0,4	2,44	2,43
0,5	2,53	2,52
0,6	2,61	2,6
0,7	2,69	2,68
0,8	2,77	2,76
0,9	2,84	2,83
1	2,92	2,9
1,1	2,98	2,94
1,2	3,02	3
1,3	3,08	3,06
1,4	3,14	3,13
1,5	3,21	3,22



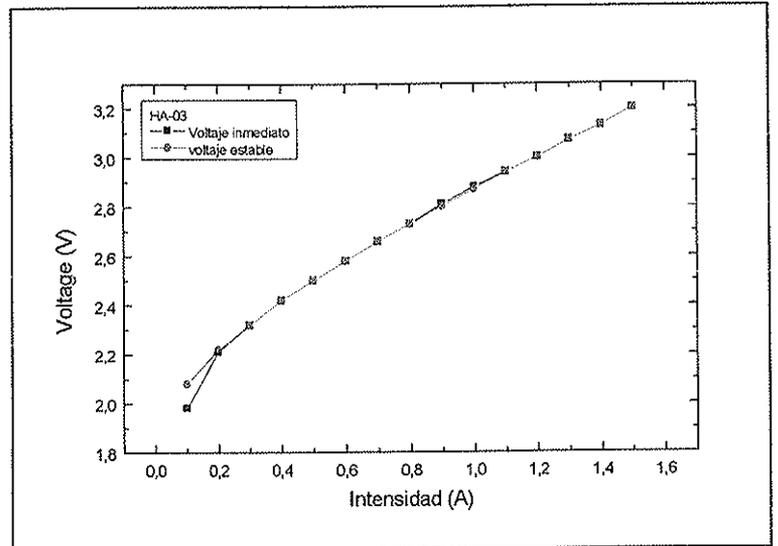
EXP HA-02

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{est.} (V)
0,1	1,96	2,07
0,2	2,24	2,26
0,3	2,39	2,4
0,4	2,52	2,52
0,5	2,64	2,64
0,6	2,75	2,75
0,7	2,86	2,85
0,8	2,96	2,95
0,9	3,06	3,05
1	3,16	3,15
1,1	3,25	3,24
1,2	3,34	3,33
1,3	3,43	3,42
1,4	3,53	3,51
1,5	3,62	3,59



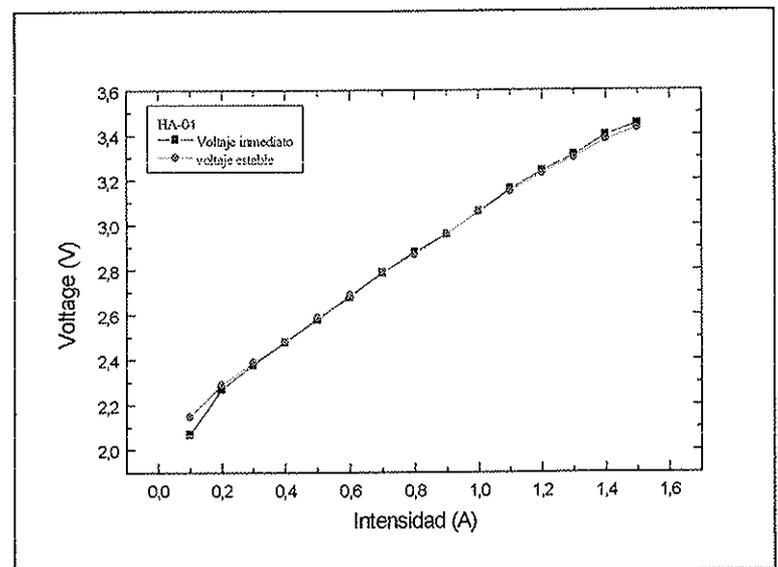
EXP HA-03

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{est.} (V)
0,1	1,98	2,08
0,2	2,21	2,22
0,3	2,32	2,32
0,4	2,42	2,42
0,5	2,5	2,5
0,6	2,58	2,58
0,7	2,66	2,66
0,8	2,73	2,73
0,9	2,81	2,8
1	2,88	2,87
1,1	2,94	2,94
1,2	3	3
1,3	3,07	3,07
1,4	3,13	3,13
1,5	3,2	3,2



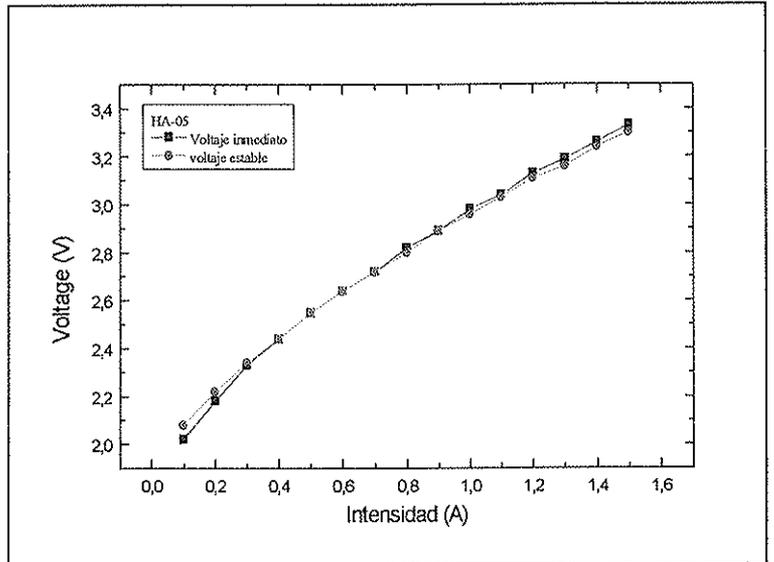
EXP HA-04

I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{est.} (V)
0,1	2,07	2,15
0,2	2,27	2,29
0,3	2,38	2,39
0,4	2,48	2,48
0,5	2,58	2,59
0,6	2,68	2,69
0,7	2,79	2,79
0,8	2,88	2,87
0,9	2,96	2,96
1	3,06	3,06
1,1	3,16	3,15
1,2	3,24	3,23
1,3	3,31	3,3
1,4	3,4	3,38
1,5	3,45	3,43



EXP HA-05

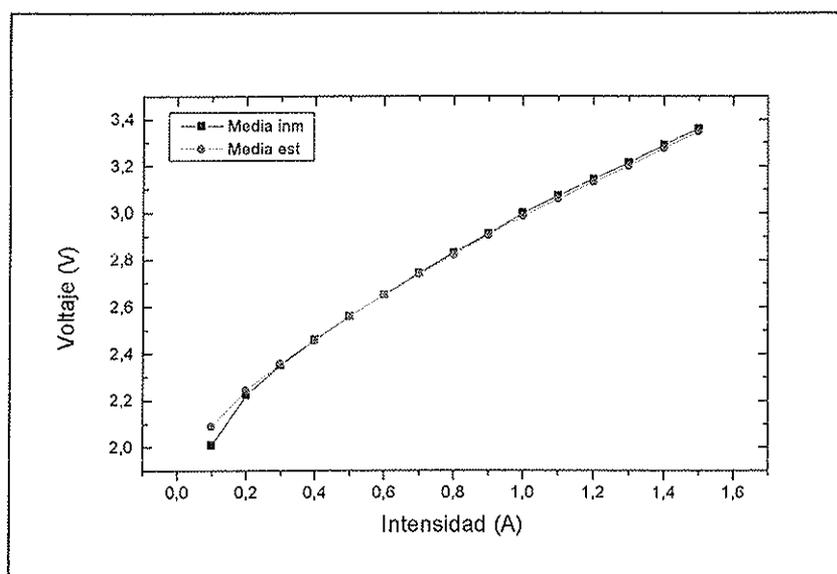
I (A)	V _{inmed.} (V)	V _{est.} (V)
0,1	2,02	2,08
0,2	2,18	2,22
0,3	2,33	2,34
0,4	2,44	2,44
0,5	2,55	2,55
0,6	2,64	2,64
0,7	2,72	2,72
0,8	2,82	2,8
0,9	2,89	2,89
1	2,98	2,96
1,1	3,04	3,03
1,2	3,13	3,11
1,3	3,19	3,16
1,4	3,26	3,24
1,5	3,33	3,3



4.2.3.- Estudio de los valores medios.

A continuación presentamos los valores medios aritméticos del potencial inmediato y del potencial estable de los experimentos realizados con campo magnético antiparalelo. Dichas medias han sido realizadas para cada valor de intensidad y manteniendo constante la distancia entre electrodos. Mostramos además, la gráfica correspondiente a las medias efectuadas. En capítulos posteriores haremos los estudios comparativos entre los ensayos a campo cero y los de campo antiparalelo.

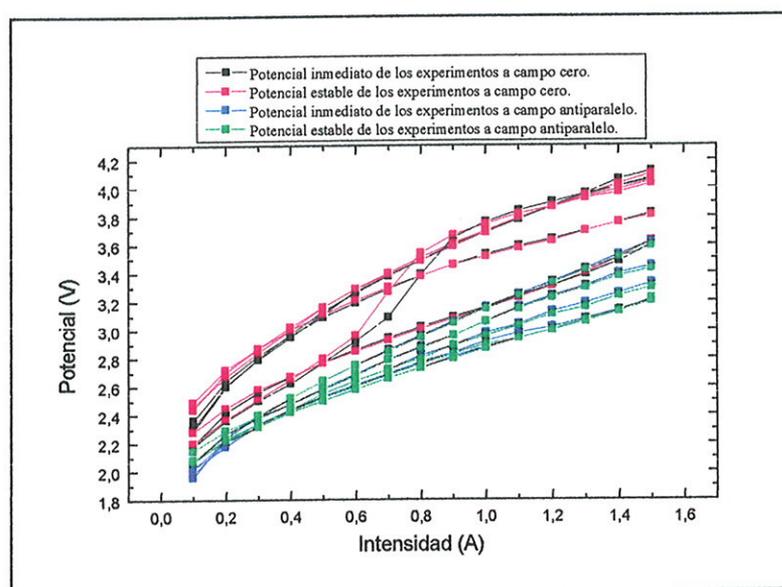
Intensidad (A)	Valores medios	
	V inmediato (V)	V estable (V)
0,1	2,01	2,098
0,2	2,224	2,244
0,3	2,352	2,358
0,4	2,46	2,458
0,5	2,56	2,56
0,6	2,652	2,652
0,7	2,744	2,74
0,8	2,832	2,822
0,9	2,912	2,906
1	3	2,988
1,1	3,074	3,06
1,2	3,146	3,134
1,3	3,216	3,202
1,4	3,292	3,278
1,5	3,362	3,348



4.3.- ESTUDIOS COMPARATIVOS.

A continuación, vamos a mostrar algunas gráficas a partir de las cuales podemos comparar los resultados de los dos tipos de ensayos, a campo cero y a campo antiparalelo. Posteriormente, haremos algunos cálculos del efecto del campo magnético e intentaremos extraer algunas conclusiones finales.

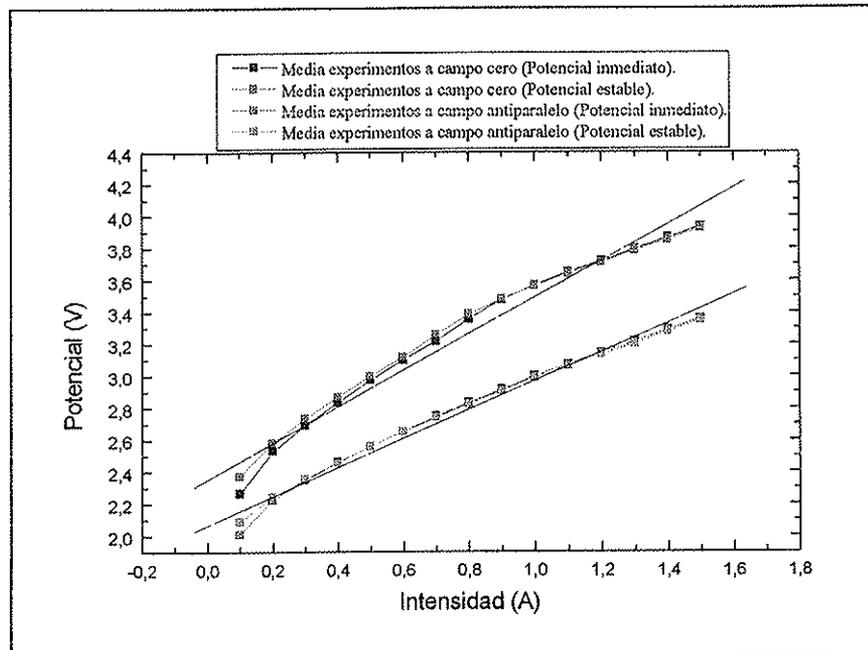
En primer lugar vamos a mostrar en una misma gráfica todos los ensayos efectuados. Los podremos distinguir fácilmente por el color de las líneas. Graficaremos en *negro* y *rojo* los experimentos efectuados a campo nulo (*negro* para el potencial inmediato y *rojo* para el potencial estable), y en *azul* y *verde* los realizados con campo antiparalelo (*azul* para el potencial inmediato y *verde* para el potencial estable).



Podemos observar que todos los experimentos con campo antiparalelo trabajan en un rango de potencial inferior a los de campo nulo. Solamente en uno de los ensayos, los valores de potencial son comparables en los dos casos. Una causa podría ser por la distancia entre electrodos. Puede que en el caso a campo cero, los electrodos hayan sido colocados a menor distancia entre ellos, y por lo tanto la caída óhmica haya sido menor, provocando así que el potencial entre electrodos fuera más bajo de los que le correspondería.

Las diferencias entre los experimentos a campo cero y con campo antiparalelo, se hacen más importantes a intensidades altas. Posiblemente sea debido a que a esas intensidades, como la influencia de la fuerza de Lorentz sobre el flujo de iones y/o electrones es mayor, las reacciones generadas en la celda facilitan mayor disociación de iones.

Podemos hacer también un estudio comparativo de los valores medios para cada grupo de ensayos. A continuación mostramos en la misma gráfica, las medias de los experimentos a campo nulo y a campo antiparalelo.



Observamos claramente, la diferencia de pendiente entre las gráficas. Dicha pendiente corresponde al valor de la resistencia óhmica definida por la Ley de Ohm. Sabemos que en general, una celda electrolítica presenta una dependencia $V(I)$ que no corresponde a dicha ley. Pero creemos que tiene sentido hablar de una resistencia efectiva $R(H)$ definida como pendiente de la curva $V(I)$, sin entrar de momento en la naturaleza de este valor. En el caso de los experimentos a campo antiparalelo, el valor de la resistencia es menor que en el caso de campo nulo. Las ecuaciones de las regresiones lineales son las siguientes:

* Para campo nulo: $V = 1.14 I + 2.35$

* Para campo antiparalelo: $V = 0.90 I + 2.06$

Por lo tanto los valores medios de las resistencias son:

* $R_0 = 1.14 \Omega$ para campo nulo

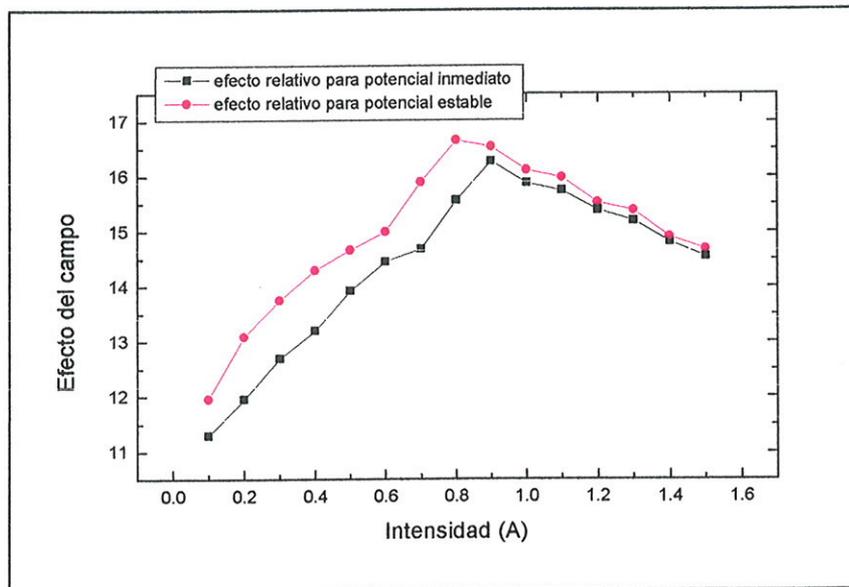
* $R_A = 0.90 \Omega$ para campo antiparalelo

Con todos estos valores podemos decir, que al aplicar un campo magnético externo facilitamos la disminución de la resistencia óhmica entre electrodos, y por lo tanto la diferencia de tensión entre ellos.

A continuación vamos a hacer un estudio del efecto del campo magnético externo de 0.9 T, haciendo uso de los valores de tensión para los diferentes ensayos. Para ello, haremos el cálculo de dicho efecto en tanto por ciento, a partir de la expresión:

$$\varepsilon = \frac{V(H0) - V(HA)}{V(H0)} \cdot 100 \%$$

Los valores utilizados para los potenciales, son los correspondientes a los valores medios de cada grupo de experimentos. En la siguiente gráfica, mostramos el efecto del campo en función de la intensidad.



Podemos observar, que el efecto relativo es máximo para los rangos de intensidad comprendidos entre 0.8 y 0.9 amperios (densidades de corriente correspondientes a 600 mA/cm²). El valor máximo corresponde a un 17 % aproximadamente. Dichos datos confirman que para esos valores de intensidad la variación entre los potenciales es considerable, y por lo tanto existe un ahorro energético al aplicar un campo magnético externo a los experimentos de electrólisis.

5.- ESTUDIOS DEL POTENCIAL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.

Hemos efectuado diferentes estudios en función del tiempo. Para ello se prepararon diversas electrólisis con la finalidad de estudiar la tensión entre electrodos durante el transcurso de los ensayos. Las electrólisis se efectuaban manteniendo la intensidad constante y durante un tiempo de 45 minutos. El motivo principal por el que hemos efectuado dichos ensayos ha sido el estudio de la estabilidad de las reacciones químicas para diferentes intensidades. Gracias a ello podemos conocer la tensión a la que estabiliza la disolución y por lo tanto podremos comparar entre todos los experimentos. Como se apreciará posteriormente las electrólisis tienden a estabilizarse con total regularidad.

Para poder tener una mejor idea de la influencia de la intensidad, se ha hecho los estudios para diferentes intensidades: 0.1 A, 0.5 A, 0.9 A y 1.5 A. En cada uno de los casos se completó el estudio midiendo con campo y sin campo aplicado. Por este motivo hemos separado los ensayos en dos semiapartados: los referentes a campo cero y en los que se aplica campo magnético externo. Posteriormente incluimos un apartado en el que hacemos los estudios comparativos.

5.1.- EXPERIMENTOS A CAMPO CERO ($H=0$).

5.1.1.- Procedimiento experimental.

Igual que en todos los otros ensayos, inicialmente limpiábamos todos los componentes que íbamos a utilizar. Tras colocar la disolución de KOH y los electrodos de platino en la celda electrolítica, colocábamos el cronómetro a cero, aplicábamos una intensidad constante y comenzábamos la electrólisis.

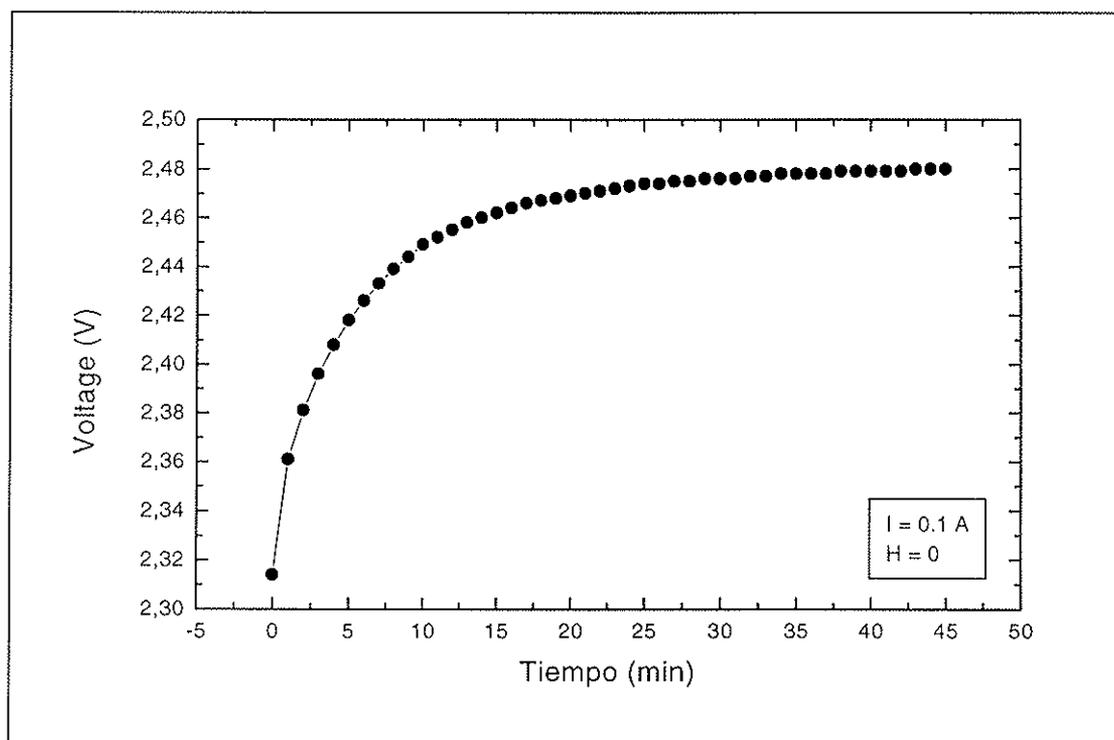
Las medidas se tomaban cada minuto, pero como al principio de las electrólisis se observaban grandes variaciones, procuramos tomar medidas cada 20 o 30 segundos durante los primeros minutos.

A todos los experimentos efectuados a campo nulo les hemos puesto la etiqueta inicial de **H0**. Además, para poder diferenciar cada ensayo colocaremos el valor de la intensidad seguido de una **I**. Así pues los experimentos serán los siguientes: H0-I0.1 (para intensidad constante de 0.1 A); H0-I0.5 (para intensidad de 0.5 A); H0-I0.9 (para intensidad de 0.9 A); y H0-I1.5 (para intensidad de 1.5 A). Mostramos a continuación las electrólisis efectuadas para dichas intensidades.

5.1.2.- Datos experimentales.

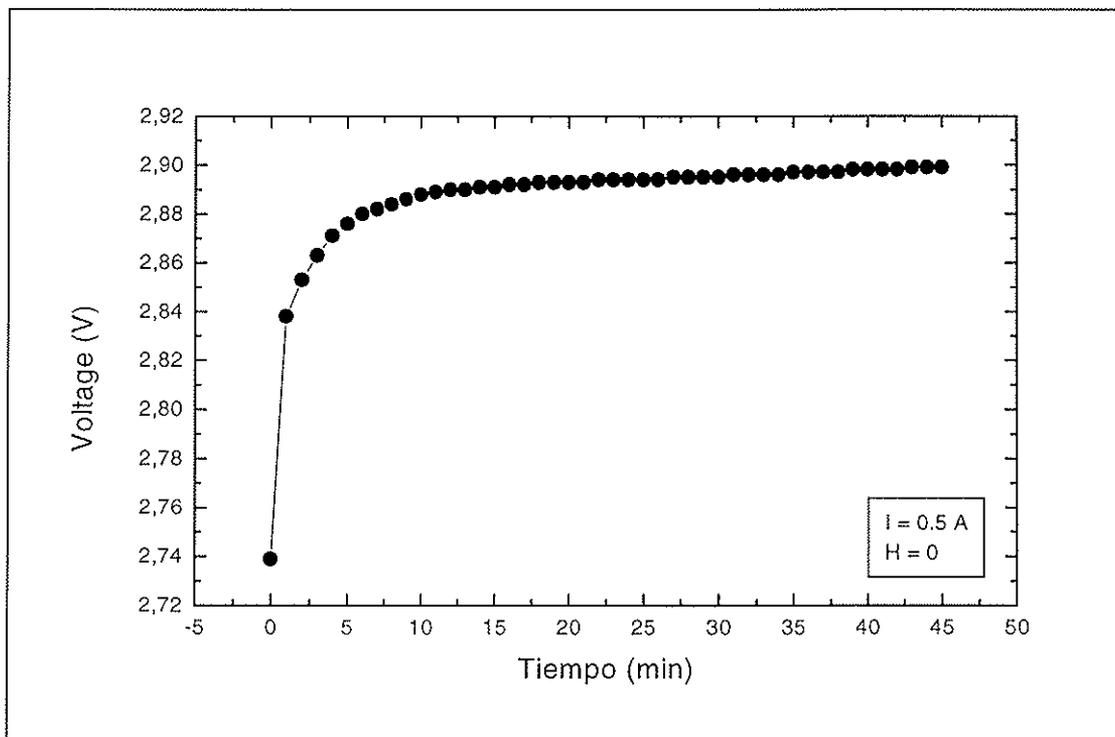
EXP H0-I0.1

t(min)	V (V)						
0	2.314	12	2.455	24	2.473	36	2.478
1	2.361	13	2.458	25	2.474	37	2.478
2	2.381	14	2.46	26	2.474	38	2.479
3	2.396	15	2.462	27	2.475	39	2.479
4	2.408	16	2.464	28	2.475	40	2.479
5	2.418	17	2.466	29	2.476	41	2.479
6	2.426	18	2.467	30	2.476	42	2.479
7	2.433	19	2.468	31	2.476	43	2.48
8	2.439	20	2.469	32	2.477	44	2.48
9	2.444	21	2.47	33	2.477	45	2.48
10	2.449	22	2.471	34	2.478		
11	2.452	23	2.472	35	2.478		



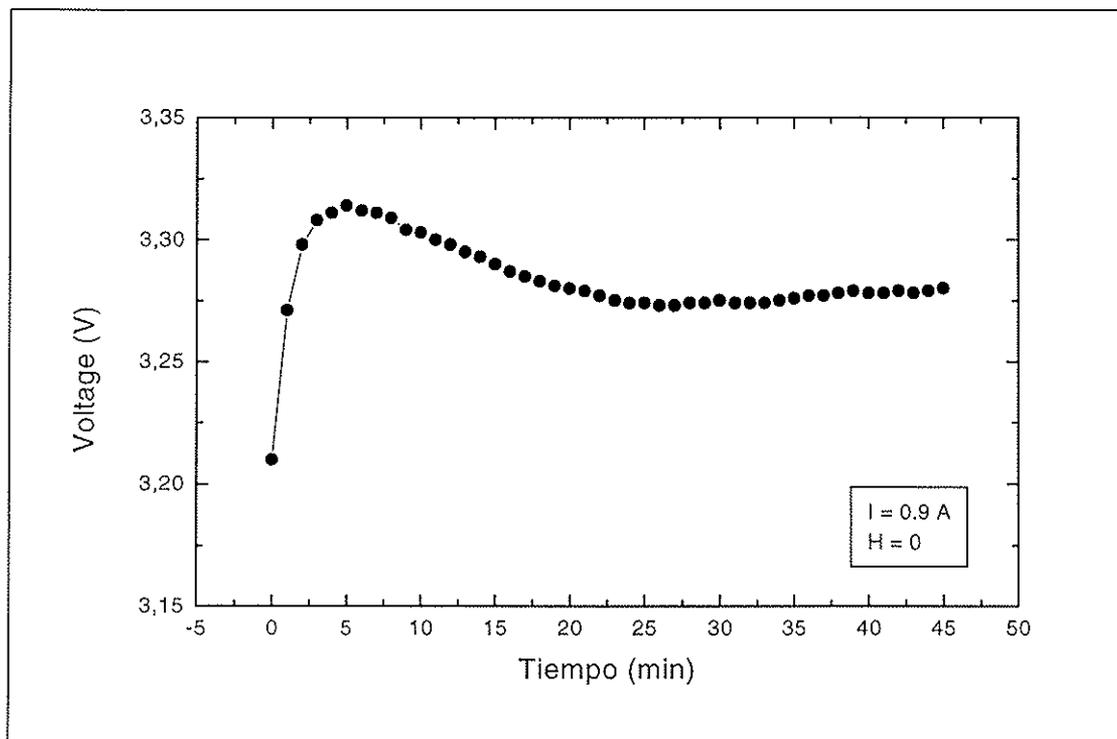
EXP H0-I0.5

t(min)	V (V)						
0	2.739	12	2.89	24	2.894	36	2.897
1	2.838	13	2.89	25	2.894	37	2.897
2	2.853	14	2.891	26	2.894	38	2.897
3	2.863	15	2.891	27	2.895	39	2.898
4	2.871	16	2.892	28	2.895	40	2.898
5	2.876	17	2.892	29	2.895	41	2.898
6	2.88	18	2.893	30	2.895	42	2.898
7	2.882	19	2.893	31	2.896	43	2.899
8	2.884	20	2.893	32	2.896	44	2.899
9	2.886	21	2.893	33	2.896	45	2.899
10	2.888	22	2.894	34	2.896		
11	2.889	23	2.894	35	2.897		



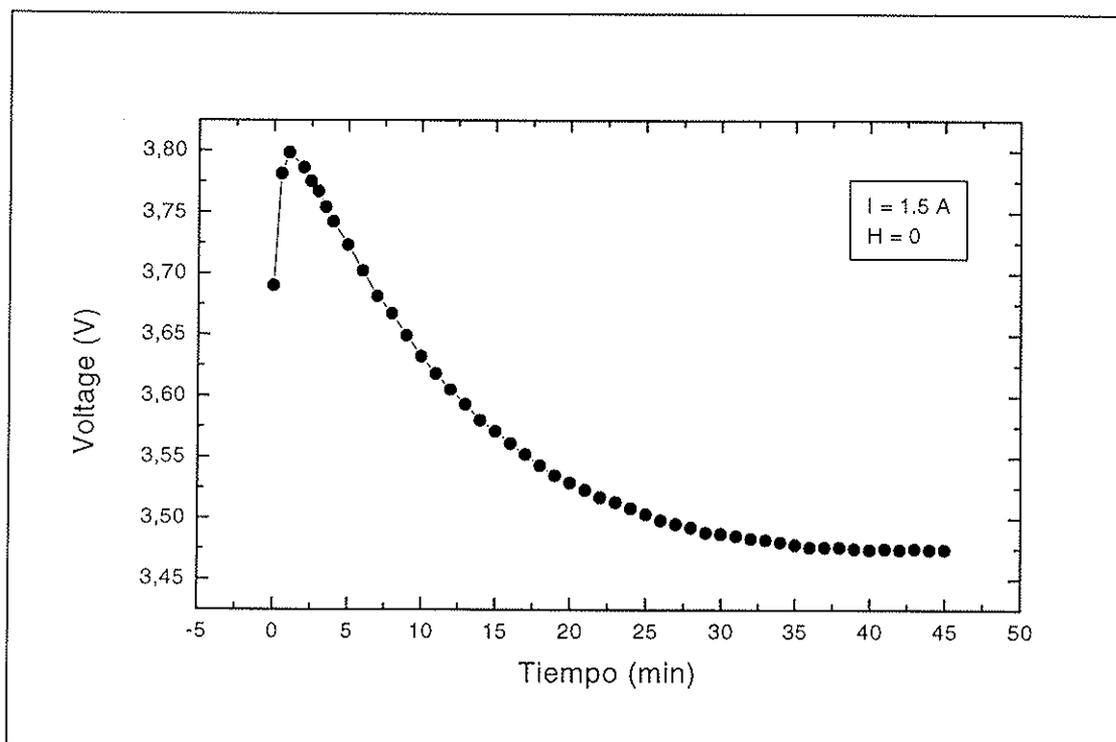
EXP H0-I0.9

t(min)	V (V)						
0	3.21	12	3.298	24	3.274	36	3.277
1	3.271	13	3.295	25	3.274	37	3.277
2	3.298	14	3.293	26	3.273	38	3.278
3	3.308	15	3.29	27	3.273	39	3.279
4	3.311	16	3.287	28	3.274	40	3.278
5	3.314	17	3.285	29	3.274	41	3.278
6	3.312	18	3.283	30	3.275	42	3.279
7	3.311	19	3.281	31	3.274	43	3.278
8	3.309	20	3.28	32	3.274	44	3.279
9	3.304	21	3.279	33	3.274	45	3.28
10	3.303	22	3.277	34	3.275		
11	3.3	23	3.275	35	3.276		



EXP H0-I1.5

t(min)	V (V)						
0	3.69	10	3.632	23	3.513	36	3.476
0.5	3.781	11	3.618	24	3.508	37	3.476
1	3.798	12	3.605	25	3.503	38	3.476
2	3.786	13	3.593	26	3.498	39	3.475
2.5	3.775	14	3.58	27	3.495	40	3.474
3	3.767	15	3.571	28	3.492	41	3.475
3.5	3.754	16	3.561	29	3.488	42	3.474
4	3.742	17	3.552	30	3.487	43	3.475
5	3.723	18	3.543	31	3.485	44	3.474
6	3.702	19	3.535	32	3.483	45	3.474
7	3.681	20	3.529	33	3.482		
8	3.667	21	3.523	34	3.48		
9	3.649	22	3.517	35	3.478		



5.2.- EXPERIMENTOS CON CAMPO ANTIPARALELO.

5.2.1.- Procedimiento experimental.

En el caso de los experimentos con campo magnético externo aplicado procedimos igual que en el caso de los ensayos a campo nulo. La preparación de las disoluciones y el protocolo de medida fueron iguales. Todos los estudios se efectuaron a las mismas intensidades que en el caso anterior, lo cual nos permitirá poder hacer un estudio comparativo posterior.

Igual que en el caso de las medidas de potencial en función de la intensidad, se decidió hacer las electrólisis con campo magnético antiparalelo (procedimiento explicado en el capítulo 4). La decisión por la que se hizo a este campo, fue porque en las medidas efectuadas en el proyecto anterior, se observaban mayores diferencias en el caso del campo magnético antiparalelo frente al paralelo.

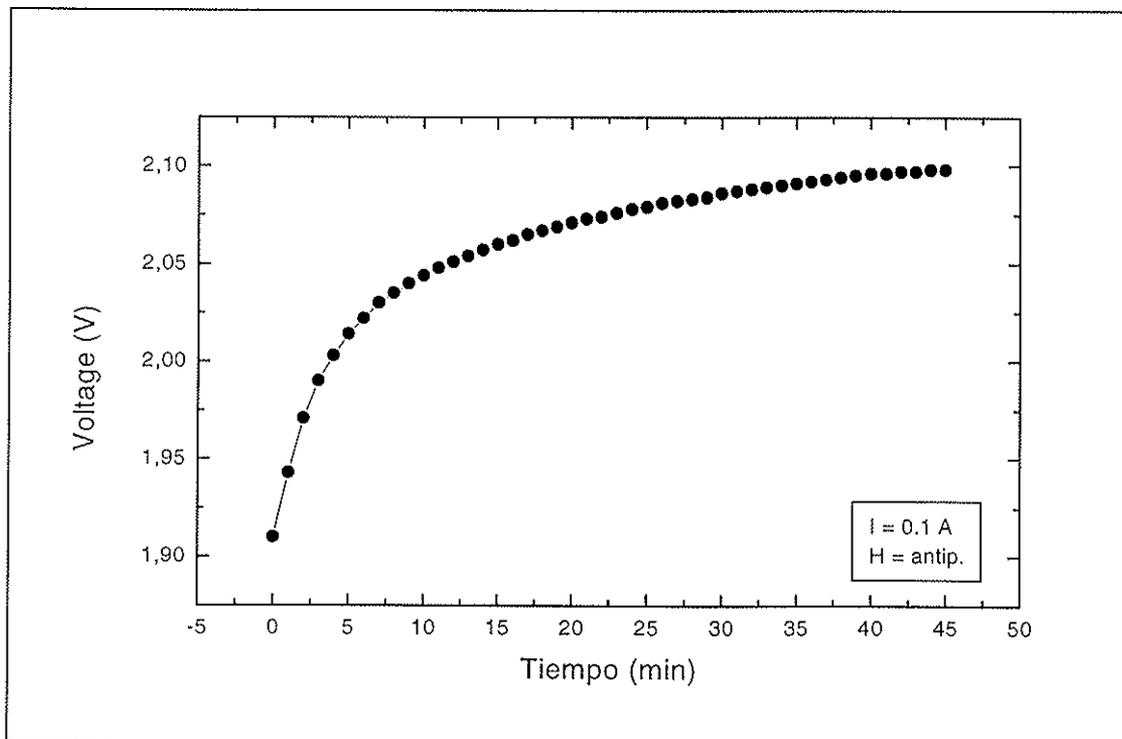
La nomenclatura utilizada en este caso fue la siguiente: utilizamos las siglas **HA** para diferenciar que los experimentos son con campo magnético antiparalelo. Sin embargo para la nomenclatura de las intensidades no se ha cambiado nada. Por lo tanto los ensayos han sido nombrados de la siguiente manera: HA-I0.1 (para intensidad constante de 0.1 A); HA-I0.5 (para intensidad de 0.5 A); HA-I0.9 (para intensidad de 0.9 A); y HA-I1.5 (para intensidad de 1.5 A).

Es importante mencionar el hecho de que los experimentos para intensidad de 1.5 A se han efectuado 3 veces. El motivo principal fue que al obtener los datos del primer ensayo, creímos haber cometido algún error experimental, debido a la morfología de la curva $V(t)$. Al medirlo una segunda vez obtuvimos una curva diferente y para poder corroborar cual era el comportamiento correcto, volvimos a medir una tercera vez. Para poder diferenciar las tres medidas remarcaremos las dos últimas como 1ª y 2ª repetición. Después de mostrar los datos con las respectivas gráficas haremos una valoración de estos tres últimos ensayos.

5.2.2.- Datos experimentales.

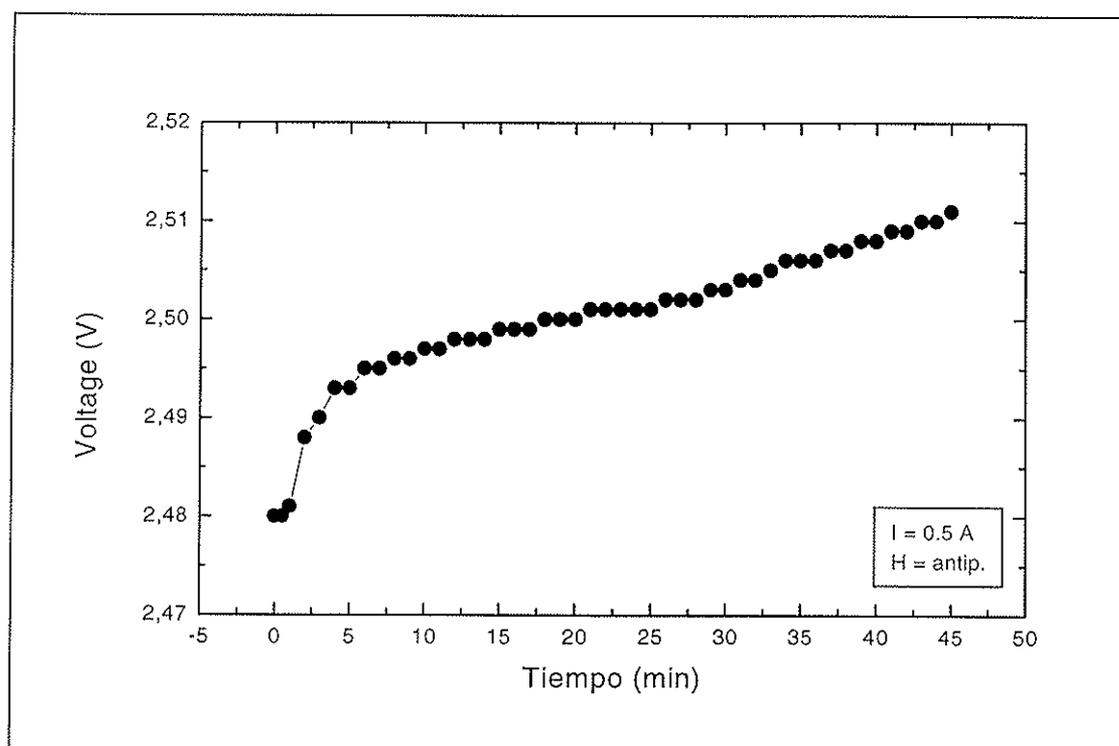
EXP HA-I0.1

t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)
0	1.91	12	2.051	24	2.078	36	2.092
1	1.943	13	2.054	25	2.079	37	2.093
2	1.971	14	2.057	26	2.081	38	2.094
3	1.99	15	2.06	27	2.082	39	2.095
4	2.003	16	2.062	28	2.083	40	2.096
5	2.014	17	2.065	29	2.084	41	2.096
6	2.022	18	2.067	30	2.086	42	2.097
7	2.03	19	2.069	31	2.087	43	2.097
8	2.035	20	2.071	32	2.088	44	2.098
9	2.04	21	2.073	33	2.089	45	2.098
10	2.044	22	2.074	34	2.09		
11	2.048	23	2.076	35	2.091		



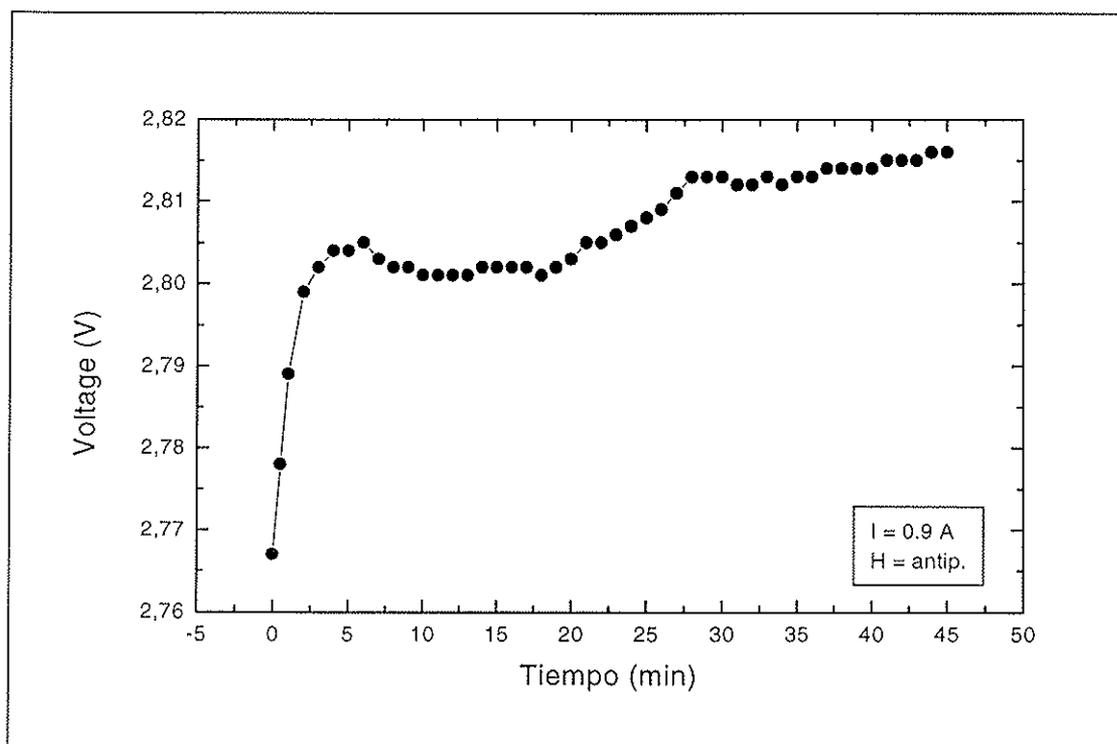
EXP HA-10.5

t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)
0	2.48	11	2.497	23	2.501	35	2.506
0.5	2.48	12	2.498	24	2.501	36	2.506
1	2.481	13	2.498	25	2.501	37	2.507
2	2.488	14	2.498	26	2.502	38	2.507
3	2.49	15	2.499	27	2.502	39	2.508
4	2.493	16	2.499	28	2.502	40	2.508
5	2.493	17	2.499	29	2.503	41	2.509
6	2.495	18	2.5	30	2.503	42	2.509
7	2.495	19	2.5	31	2.504	43	2.51
8	2.496	20	2.5	32	2.504	44	2.51
9	2.496	21	2.501	33	2.505	45	2.511
10	2.497	22	2.501	34	2.506		



EXP HA-I0.9

t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)
0	2.767	11	2.801	23	2.806	35	2.813
0.5	2.778	12	2.801	24	2.807	36	2.813
1	2.789	13	2.801	25	2.808	37	2.814
2	2.799	14	2.802	26	2.809	38	2.814
3	2.802	15	2.802	27	2.811	39	2.814
4	2.804	16	2.802	28	2.813	40	2.814
5	2.804	17	2.802	29	2.813	41	2.815
6	2.805	18	2.801	30	2.813	42	2.815
7	2.803	19	2.802	31	2.812	43	2.815
8	2.802	20	2.803	32	2.812	44	2.816
9	2.802	21	2.805	33	2.813	45	2.816
10	2.801	22	2.805	34	2.812		



EXP HA-I1.5

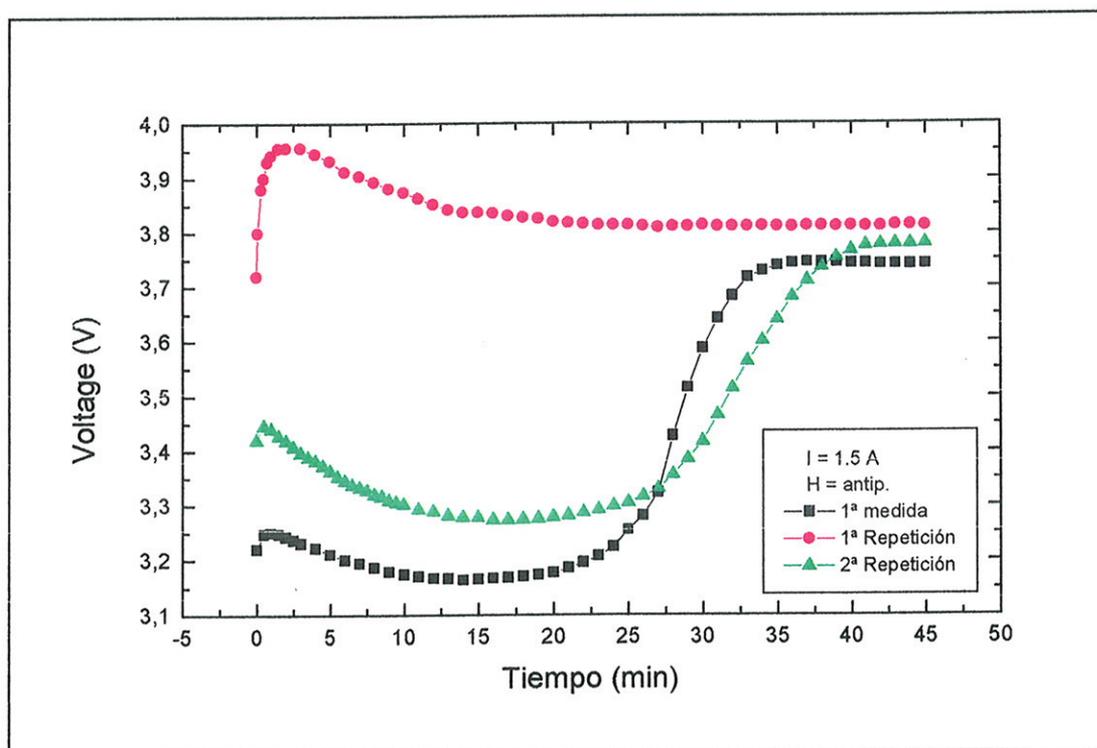
t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)
0	3.22	10	3.174	23	3.207	36	3.743
0.5	3.248	11	3.17	24	3.224	37	3.745
1	3.25	12	3.167	25	3.255	38	3.744
1.5	3.248	13	3.166	26	3.281	39	3.744
2	3.243	14	3.164	27	3.323	40	3.742
2.5	3.237	15	3.165	28	3.427	41	3.742
3	3.231	16	3.167	29	3.515	42	3.741
4	3.222	17	3.168	30	3.587	43	3.741
5	3.211	18	3.17	31	3.641	44	3.74
6	3.201	19	3.173	32	3.683	45	3.741
7	3.195	20	3.177	33	3.717		
8	3.187	21	3.186	34	3.729		
9	3.179	22	3.196	35	3.738		

EXP HA-I1.5 (1ª Repetición)

t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)
0	3.72	8	3.893	21	3.818	34	3.812
0.08	3.8	9	3.881	22	3.816	35	3.811
0.33	3.88	10	3.874	23	3.814	36	3.81
0.5	3.9	11	3.863	24	3.814	37	3.812
0.75	3.93	12	3.852	25	3.814	38	3.812
1	3.942	13	3.842	26	3.812	39	3.811
1.5	3.955	14	3.837	27	3.809	40	3.812
2	3.956	15	3.837	28	3.811	41	3.811
3	3.956	16	3.836	29	3.811	42	3.811
4	3.945	17	3.831	30	3.813	43	3.813
5	3.932	18	3.828	31	3.811	44	3.813
6	3.912	19	3.826	32	3.811	45	3.812
7	3.904	20	3.82	33	3.811		

EXP HA-II.5 (2ª Repetición)

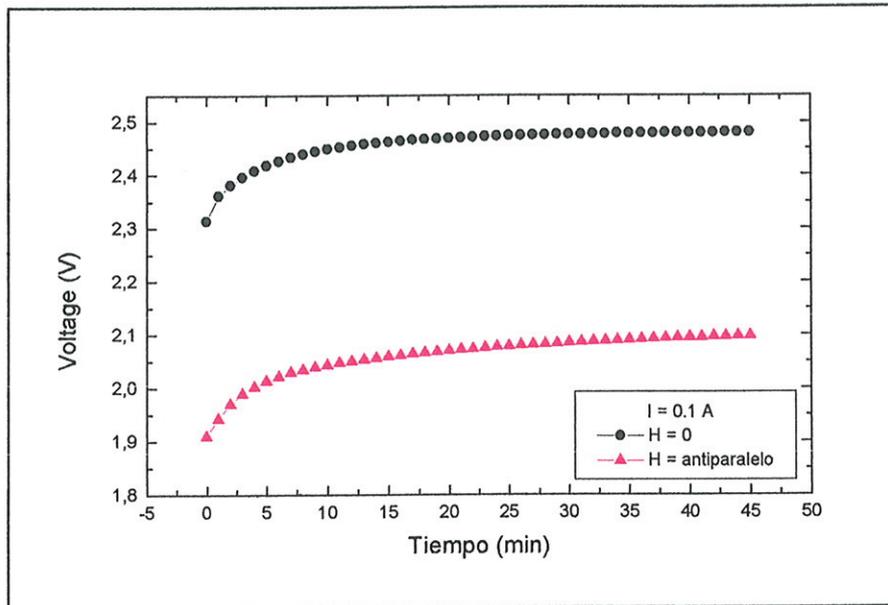
t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)	t(min)	V(V)
0	3.42	7	3.332	18	3.275	32	3.514
0.5	3.446	7.5	3.327	19	3.276	33	3.563
1	3.44	8	3.32	20	3.279	34	3.601
1.5	3.427	8.5	3.316	21	3.282	35	3.64
2	3.418	9	3.309	22	3.287	36	3.681
2.5	3.407	9.5	3.305	23	3.292	37	3.711
3	3.396	10	3.302	24	3.299	38	3.736
3.5	3.388	11	3.293	25	3.305	39	3.753
4	3.381	12	3.289	26	3.317	40	3.766
4.5	3.372	13	3.282	27	3.33	41	3.775
5	3.363	14	3.279	28	3.356	42	3.777
5.5	3.352	15	3.278	29	3.385	43	3.778
6	3.345	16	3.274	30	3.417	44	3.778
6.5	3.337	17	3.274	31	3.465	45	3.779



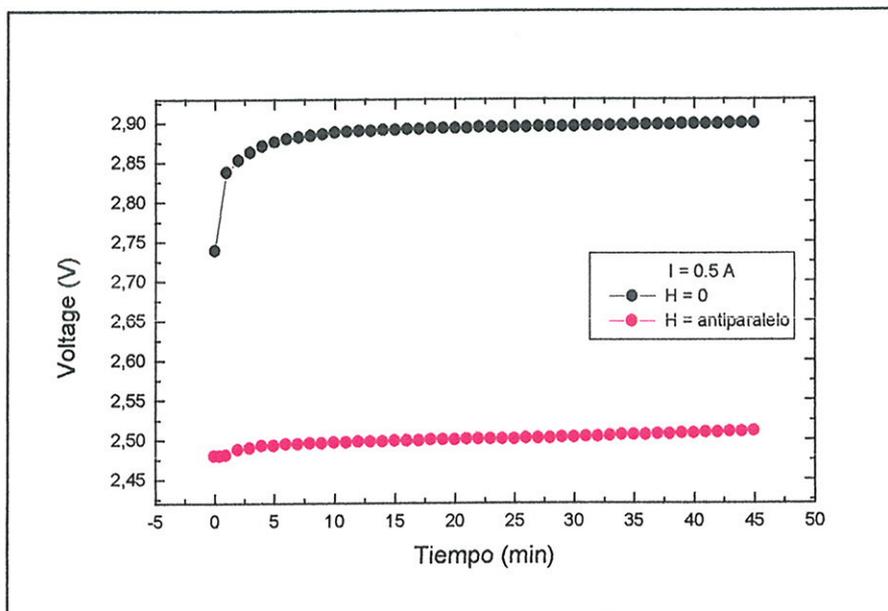
Como se ha podido comprobar, para una intensidad de $I = 1.5$ A hemos obtenido diferentes resultados. Sospechamos que es debido a que nos encontramos en un régimen turbulento. Las disoluciones químicas sometidas a ensayos electrolíticos con intensidades débiles, tienen un comportamiento bastante estacionario. Sin embargo en el caso de $I = 1.5$ A y además con campo magnético aplicado, la turbulencia de la reacción, manifestada por una evaporación exagerada de gases, se refleja en los diferentes resultados obtenidos para dichos experimentos.

5.3.- ESTUDIOS COMPARATIVOS.

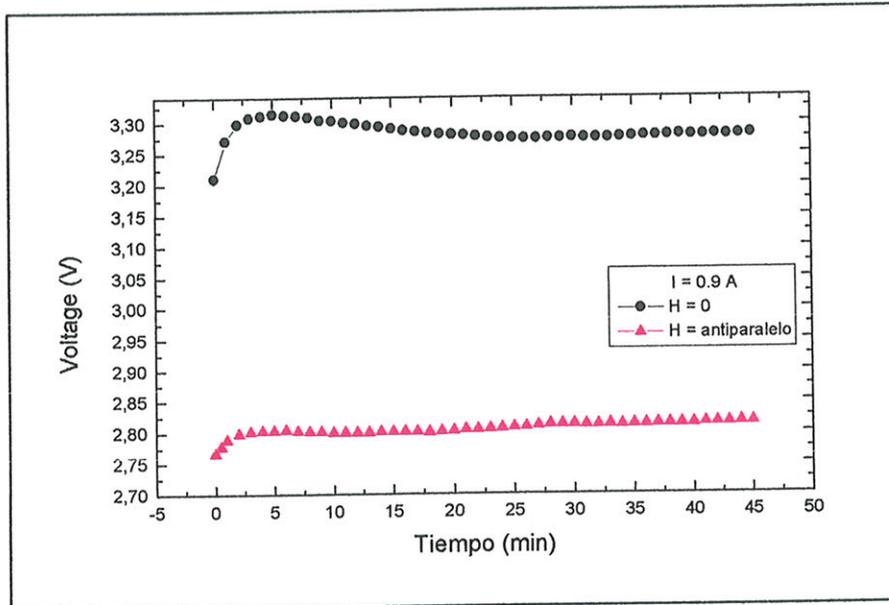
A continuación presentamos unos estudios comparativos entre los experimentos efectuados con y sin campo magnético aplicado. Todos los datos pertenecen a valores de tensión en función del tiempo. Para poder observar con claridad el efecto del campo magnético separamos los estudios para diferentes intensidades (0.1, 0.5, 0.9 y 1.5 A). Así pues obtenemos las siguientes gráficas:



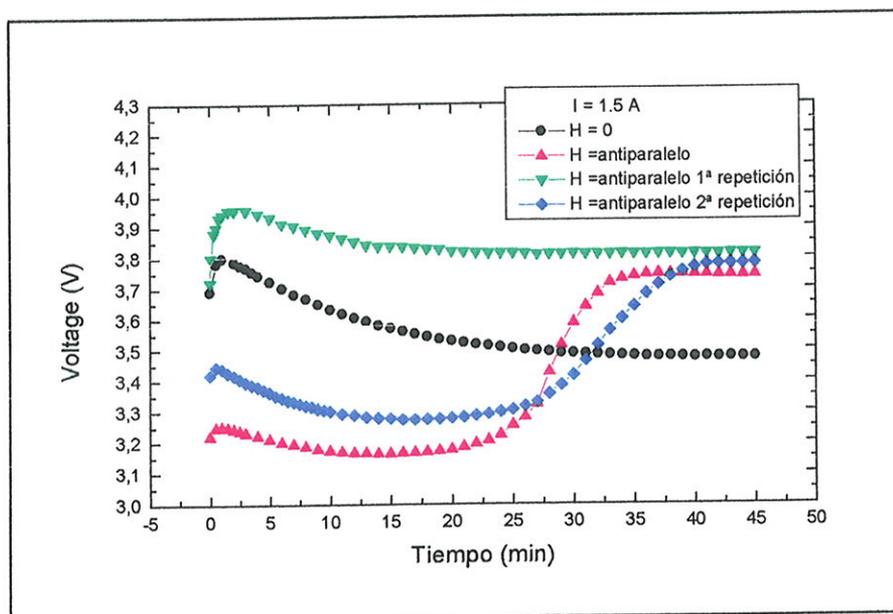
Medidas comparativas de $V(t)$ a $I = 0.1$ A para campo nulo y campo antiparalelo



Medidas comparativas de $V(t)$ a $I = 0.5$ A para campo nulo y campo antiparalelo



Medidas comparativas de $V(t)$ a $I = 0.9$ A para campo nulo y campo antiparalelo



Medidas comparativas de $V(t)$ a $I = 1.5$ A para campo nulo y campo antiparalelo

Como podemos apreciar en las gráficas anteriores, las electrólisis efectuadas con campo magnético aplicado, nos muestran una función $V(t)$ por debajo de las efectuadas sin campo aplicado. En el caso de $I = 1.5 \text{ A}$ no podemos hacer una valoración concreta ya que tenemos diferentes medidas con campo aplicado. Tal y como comentamos en el apartado anterior, las medidas son tan diferentes debido a los regímenes que podía seguir la cinética de las reacciones en el momento de los ensayos electrolíticos. En el caso concreto en el que la intensidad es 1.5 A y estamos aplicando el campo magnético externo, pasamos a un régimen turbulento. La salida de gases de la celda electrolítica se acelera provocando así unas presiones parciales de los gases que intervienen, hidrógeno y oxígeno. Estas presiones parciales hacen variar el valor de la tensión entre electrodos siguiendo la siguiente ley:

$$V = V_0 + \frac{R \cdot T}{2F} \cdot \ln \left[\frac{(P_{H_2})(P_{O_2})^{1/2}}{a_{H_2O}} \right]$$

Donde V_0 es un potencial estándar (1.22 V para una densidad de corriente de 100 mA/cm^2), R es la constante molar de los gases, T es la temperatura en Kelvin, F es la constante de Faraday, P_{H_2} y P_{O_2} son las presiones parciales del hidrógeno y del oxígeno respectivamente y a_{H_2O} es la actividad molecular del agua (F.Hine, "Electrode processes and electrochemical engineering", N.Y., 1985, p. 14).

Por lo tanto, excluyendo el caso de $I = 1.5 \text{ A}$, podemos afirmar que para intensidades hasta 0.9 A conseguimos disminuir la tensión entre los electrodos al aplicar un campo magnético externo.

Para poder examinar los datos cuantitativamente hemos hecho el estudio del efecto del campo tal y como hicimos para las electrólisis $I(V)$. A partir de la expresión:

$$\varepsilon = \frac{V(H0) - V(HA)}{V(H0)} \cdot 100\%$$

Mostramos a continuación una tabla con los valores obtenidos del efecto del campo para cada una de las intensidades estudiadas:

I (A)	0.1	0.5	0.9
ε (%)	15.7	13.5	14.3

Podemos apreciar que el efecto del campo es muy parecido para cada intensidad y es del orden del 14 %. Recordemos que en el caso de los estudios de I(V) obteníamos un valor máximo del 17 %, lo cual es comparable con el último obtenido.

Queremos aportar también los datos obtenidos del estudio del consumo energético para cada intensidad. Tendremos en cuenta si es con campo nulo o campo magnético aplicado. Para calcular dicho consumo energético necesitaremos el valor del potencial medio V_m que conseguiremos aplicando la expresión:

$$V_m = \frac{\int V \cdot dt}{\int dt} = \frac{\int V \cdot dt}{t_{total}}$$

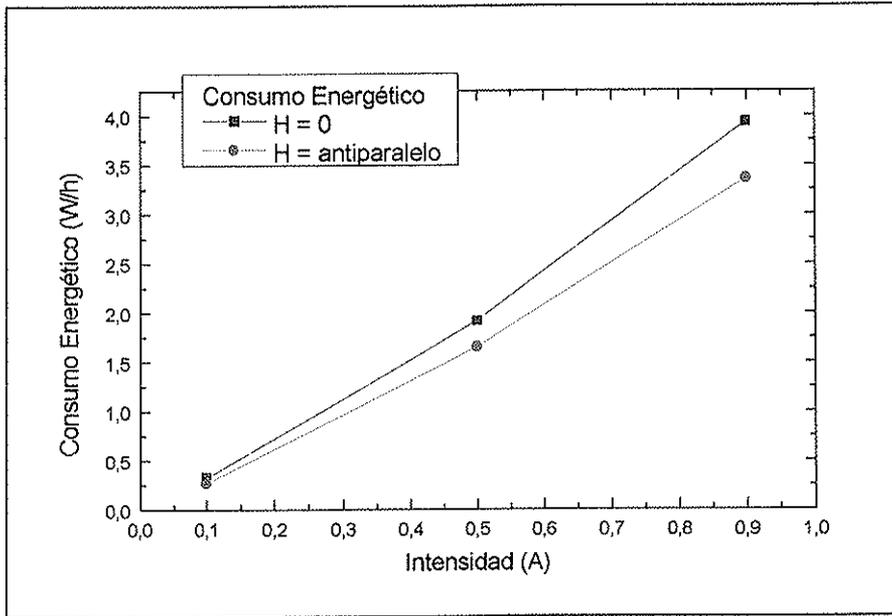
donde la integral del numerador se obtiene de la propia curva V(t) para cada caso. Los valores obtenidos para los consumos energéticos se muestran en la siguiente tabla:

I (A)	V_m (V)	t(h)	W (W/h)
0.1	2.44	0.75	0.325
0.1	2.06	0.75	0.274
0.5	2.88	0.75	1.920
0.5	2.48	0.75	1.653
0.9	3.28	0.75	3.936
0.9	2.8	0.75	3.360

Mostramos en la siguiente página los valores del consumo energético graficados en función de la intensidad. Podemos apreciar que la diferencia absoluta de consumo energético aumenta para intensidades altas. Sin embargo si estudiamos el efecto relativo del consumo energético, definido como

$$\varepsilon_w = \frac{W(H0) - W(HA)}{W(H0)} \cdot 100\%$$

observamos que los valores no cambian. Por ejemplo para I = 0.1 A $\varepsilon_w = 15.6\%$; para I = 0.5 A $\varepsilon_w = 13.9\%$ y para I = 0.9 A $\varepsilon_w = 14.6\%$.

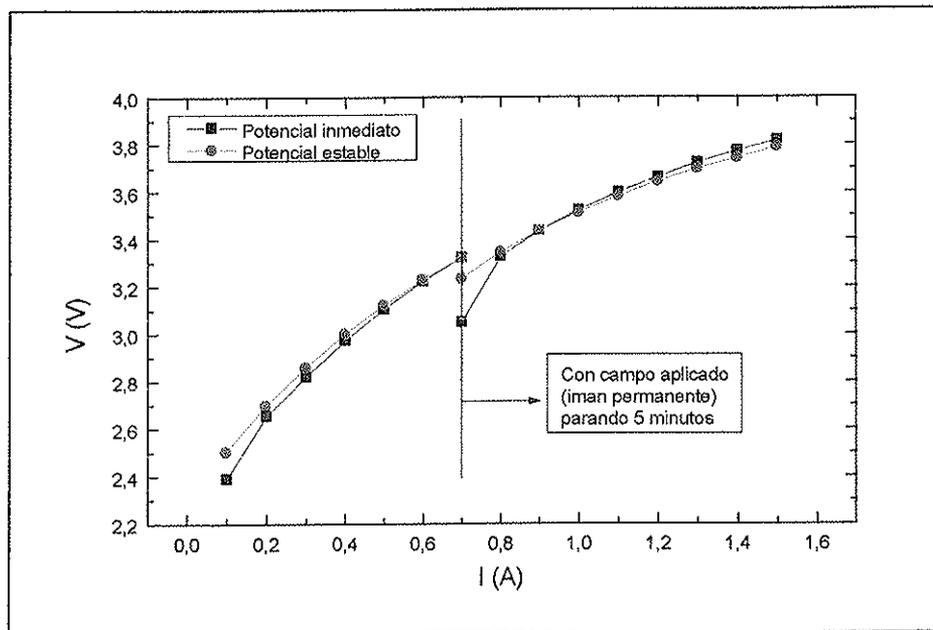


6.- EXPERIMENTOS CON VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO APLICADO.

Como ya se ha podido demostrar en capítulos anteriores, el efecto del campo magnético externo es importante. Dicho efecto ayuda a ahorrar energía en el momento de efectuar las electrólisis. Pero es importante resaltar que todo ello ha sido estudiado con una técnica que hemos llamado *barrido de intensidades*.

Hemos intentado observar el efecto del campo magnético sobre las electrólisis pero a una corriente constante y variando el campo magnético a medida que se efectuaba el ensayo. Los problemas han sido importantes, ya que para cualquier movimiento de la celda electrolítica obteníamos unas variaciones notables de la tensión, lo cual nos hacía obtener muchos errores en las medidas. Después de varios ensayos decidimos que la única manera de poder observarlo era intentar comenzar una electrólisis con una "*barrida en intensidad*" sin campo aplicado, y a medio experimento hemos parado de medir y hemos colocado la celda electrolítica dentro del imán para continuar midiendo con campo magnético aplicado. En la parada que hicimos para cambiar la celda y colocarla dentro del imán, dejamos reposar durante 5 minutos para conseguir continuar la electrólisis a partir de una tensión estable.

En la siguiente gráfica mostramos los resultados del ensayo anteriormente descrito:



Como podemos apreciar las medidas anteriores a la línea corresponden al barrido de intensidad sin campo magnético aplicado. Las medidas posteriores son con campo magnético aplicado. Justo en el momento de parar apreciamos un descenso del potencial, pero que recuperamos rápidamente al aumentar la intensidad. Por lo tanto podemos afirmar que con este método no observamos un descenso continuo de la tensión al aplicar el campo magnético, tal y como se observaba en el caso del barrido de intensidad.

7.- CONCLUSIONES.

El análisis de los resultados obtenidos conduce a las siguientes conclusiones:

1.- El efecto de un campo magnético externo homogéneo y constante de 0.9 teslas sobre la electrólisis del agua en disoluciones alcalinas, es real, reproducible, y puede llegar hasta un ahorro energético del 17 % para intensidades de 0.8 A.

2.- El estudio de los ahorros energéticos mostrados nos permiten asegurar que la energía necesaria para producir hidrógeno y oxígeno a partir de la electrólisis del agua, es menor cuando dicha electrólisis se efectúa bajo la influencia un campo magnético aplicado. Es importante resaltar que dichos ensayos han sido realizados estudiando la tensión para diferentes barridos de intensidad.

3.- En presencia del campo magnético externo, la cinética de las reacciones en las zonas cercanas a los electrodos, pasa de régimen estacionario a turbulento para menores densidades de corriente eléctrica. Este efecto se observa claramente en el caso de $I = 1.5 \text{ A}$, ya que cuando se aplica un campo magnético obtenemos diferentes datos debido al régimen turbulento. Sin embargo, este fenómeno no sucede para la misma intensidad y en ausencia del campo magnético.

4.- La turbulencia observada en el caso anterior nos hace pensar que el campo magnético acelera las reacciones electródicas, pudiéndose mejorar así el rendimiento de obtención de hidrógeno y oxígeno.