

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



**Implementación de la Corriente
Periodica Reversible en la
Refineria de Cobre de Ilo. Aspectos
Eléctricos**

T E S I S

**Para Optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista**

Arturo Ten Salas

Promoción 1978 - 2

L I M A E P E R U

1987

**IMPLEMENTACION DE LA
CORRIENTE PERIODICA REVERSIBLE
EN LA REFINERIA DE COBRE DE ILO
ASPECTOS ELECTRICOS.**

**AUTOR: ARTURO TEN SALAS
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRICISTA**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
Y ELECTRONICA - PAIME
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

LIMA 1,987

corriente directa aplicada a las celdas electrolíticas, para lo cual es importante mantener constante los niveles de la corriente que circula en uno y otro sentido, así como la relación entre los tiempo de conducción directo e inverso. Mediante esta técnica, se evitan los efectos de polarización y pasivación anódica, permitiendo incrementar subtancialmente el valor de la corriente aplicada.

Para una demanda máxima de 7.2 MW, $fp=1$, existen disponibles más de 7 MW para la modificación en el método de refinación CPR.

Considerando los siguientes aspectos:

1. Distribución de voltajes DC a tierra.
2. Influencia de la conmutación y potencia variable en el circuito eléctrico.
3. Metalurgia y operaciones.

Deberá contarse con 2 rectificadores CPR para alimentar a las celdas electrolíticas comerciales. Cada rectificador con una capacidad nominal de 7,095 KW DC, estará alimentado por 10 KV.

La actual distribución de corriente continua es realizada por un sistema de barras con una sección total de 21,000 mm². Mediante un cálculo térmico y la comparación pérdidas Vs. inversión, se establece una nueva sección de 27,000 mm² para el sistema CPR.

A partir de las características de consumo de los rectificadores CPR, se esquematizan las modificaciones en el equipo de media tensión (Interruptores, cableado y sistema de protección) necesarios para satisfacer los requerimientos. Se determina la compensación reactiva requerida.

Finalmente, se evalúa técnica y económicamente el proyecto de ampliación CPR de 58,000 TM anuales.

El monto total de inversiones se estima en US\$ 59.6 millones, los costos anuales operacionales en US\$ 5.2 millones y las tasas de retorno

de inversión son del 9.8 y 15.1% para las alternativas de inversión con y sin impuestos de importación respectivamente.

Se evalúa el proyecto CPR Vs. una planta DC de 58,000 TM/Año en cuanto a requerimientos de inversión y costos anuales de operación.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PROLOGO	1
CAPITULO I. INTRODUCCION	
1.1. Introducción	3
1.2. Proceso electrolítico en CD y CPR	8
1.3. Refinación electrolítica del cobre mediante el uso de la corriente periódica reversible	13
1.4. Conclusiones	29
CAPITULO II. ASPECTOS DE DISEÑO Y PARAMETROS ELECTRICOS DE LA REFINERIA DE COBRE	
2.1. Generalidades	31
2.2. Alta y media tensión	31
2.3. Balance de energía AC	31
2.4. Energía DC	35
2.5. Energía reactiva	35
2.6. Conclusiones	36
CAPITULO III. RECTIFICADOR CPR	
3.1. Rectificador comercial actual	37
3.2. Rectificador CPR	44
3.3. Potencia activa y reactiva	53
3.4. Conclusiones	56
CAPITULO IV. DISTRIBUCION EN CORRIENTE CONTINUA	
4.1. Sistema actual	57
4.2. Rediseño de barras	63
4.3. Rediseño de recorrido	66
4.4. Sistema de puenteo	67
4.5. Conclusiones	68
CAPITULO V. MEDIA TENSION CON CPR	
5.1. Distribución en 10 KV	71
5.2. Distribución en 3.8 KV	79
5.3. Sistemas de protección y medición	79
CAPITULO VI. MEDIA Y BAJA TENSION EN CASA TANQUE	
6.1. Consideraciones	80
6.2. Media tensión en casa tanque	80
6.3. Ampliaciones en baja tensión	81

CAPITULO VII. ASPECTOS TECNICO-ECONOMICOS. COMPARACION CD Vs CPR	
7.1. Perfil técnico-económico. Proyecto de ampliación de la Refinería de Cobre de Ilo por el proceso CPR a 58,000 TM/Año	88
7.2. Comparación CPR Vs CD proyecto de ampliación de la RCu Ilo a 58,000 TM/Año	95
7.3. Ventajas y desventajas con CPR (Comparado con CD)	100
CONCLUSIONES	105
MATERIAL BIBLIOGRAFICO	109
ANEXO I CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA Y VAPOR CON CPR	111
ANEXO II PLANTA ELECTROLITICA. DETERMINACION DE CARAC- TERISTICAS E INVERSION ESTIMADA PARA AMPLIA- CION A 58,000 TM CON TECNOLOGIA CONVENCIONAL	113
ANEXO III CONTACTOS HUMEDOS	115
ANEXO IV GLOSARIO DE TERMINOS	118
ANEXO V SIMBOLOGIA UTILIZADA	123

P R O L O G O

El uso de la corriente periódica reversible en la electrólisis del cobre, introducido a nivel comercial durante la década del '60 con el ad
venimiento del tiristor, representa una alternativa técnica y económica tanto para las nuevas plantas de electrólisis como para aquellas -
que desean incrementar su nivel de producción. Dentro del segundo gru
po se encuentra la Refinería de Cobre de Ilo. A nivel de anteproyecto, el presente trabajo trata sobre los aspectos eléctricos del cambio de
tecnología de tratamiento del cobre en la Refinería, los que compren--
den el 90% aproximadamente de los requeridos para el propósito ya que,
básicamente, no se requiere la erección de una nueva planta, efectivizándose el incremento de capacidad de producción a expensas de la modi
ficación de los parámetros eléctricos del proceso.

Durante el desarrollo de los capítulos, se estudian las modificaciones a efectuar, tomando como base los valores operacionales obtenidos expe
rientalmente a nivel piloto y el exceso de capacidad instalada en me
dia y alta tensión de la sub-estación principal de la Refinería. Final
mente, el proyecto es evaluado económicamente por sus méritos intrínse
cos y frente a la alternativa de instalar una planta convencional de la misma capacidad, tomando como base una ampliación de producción ob
tenible utilizando CPR, estimada en 58,000 TM/Año.

Se ha recurrido en gran medida a los valores prácticos obtenidos por expe
riencia tanto metalúrgica como eléctricamente. Se asume que el comportamiento metalúrgico del circuito electrolítico es fácilmente -
proyectable desde el nivel piloto al nivel industrial. El autor no pre
tende demostrar la precisión del comportamiento metalúrgico que se asu
me para la planta industrial y se basa mas bien en la experiencia obte
nida en diversas refinerías del mundo en donde se utiliza la tecnologi
a CPR, de las cuales se tiene conocimiento a través de boletines técni
cos, congresos, revistas, etc.

En cuanto al aspecto económico, se han tomado como fuentes los propios costos de inversión para la Refinería, estudios económicos presentados para diversos proyectos de inversión, costos de la Planta Piloto CPR y la información a la que se hace referencia líneas arriba.

Como fase posterior al presente estudio, tendría que definirse, además del aspecto mecánico y metalúrgico, los detalles de instalación de los rectificadores a poner en operación, paneles de control de media tensión, detalles de instalación de condensadores y tendido de cables, los cuales están fuera del alcance del presente trabajo. El autor considera que llega a demostrarse la factibilidad del anteproyecto, el cual deberá desarrollarse de acuerdo con las conclusiones a las que se arriban.

Desde estas líneas va el agradecimiento a quienes, con su colaboración desinteresada, contribuyeron a la realización del tema. En forma especial a la Superintendencia de Control de Producción y a la División de Metalurgia de la Refinería, quienes proporcionaron en gran medida la información que aquí se utiliza y contribuyeron con datos experimentales en base a los cuales se proyectan los parámetros más importantes a considerar en el desarrollo del tema. En forma especial, quiero agradecer a mi esposa por su constante estímulo y aliento.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Proceso electrolítico con CD y CPR. Densidad y eficiencia de corriente. Aspectos metalúrgicos. Refinación con CPR en la Refinería de Cobre de Ilo.

1.1. Introducción

La Refinería de Cobre de Ilo es una planta situada en el Departamento de Moquegua, Provincia de Ilo, a 09 Km. de la ciudad de Ilo. Su principal actividad es la refinación electrolítica del cobre (Ver "flow sheet", fig. 1), desarrollada a partir de 1,975.

Los parámetros más importantes pueden verse en la tabla N° 1. El cobre de alta pureza (99.99%) se refina dentro del marco contractual con la empresa S.P.C.C., proveedora del blister como materia prima y a quien presta, la Refinería, el servicio de refinación electrolítica.

La Refinería de Cobre de Ilo procesa aproximadamente el 60% de la producción anual del cobre blister producido por S.P.C.C., estimada en 260,000 TM/Año. En consecuencia, teóricamente, es posible procesar electrolíticamente un tonelaje superior de blister, de contarse con la capacidad adecuada.

La refinación convencional del cobre (Corriente continua) llevada a cabo en las instalaciones de la RCu, asegura una producción anual de 150,000 TM y los estudios a nivel metalúrgico, tendientes a incrementar su capacidad de refinación, han sido orientados, en los últimos 5 años, hacia el método no convencional de refinación denominado "Corriente Periódica Reversible" o CPR, siglas a las que nos referiremos, por comodidad, en adelante. Este método permite incrementar sustancialmente el nivel de corriente de tal forma que puede obtenerse un incremento en la capacidad de planta,

limitando la erección de nuevas celdas electrolíticas e instalación del equipo asociado.

La materia prima para la planta electrolítica, son los ánodos de cobre producidos a partir del blister en la planta de ánodos. El incremento en la capacidad de producción del cobre electrolítico, trae aparejado un incremento en la capacidad de producción de ánodos. Los datos más importantes en la planta de ánodos, son:

Producción anual de ánodos : 173,000 TM/Año

Capacidad de producción diaria: $330 \times 2 = 660$ TM

Eficiencia de planta : 95%

Ciclo de retorno : 14%

Máxima capacidad : $660 \times 360 = 237,000$ TM/Año

Producción permisible cátodos : $237,000 (86\%) = 204,336$ TM/Año

Otras posibilidades de incremento de producción de ánodos, son:

- . Transporte del blister líquido (1,200°C), con la finalidad de disminuir el tiempo de proceso y el consumo de petróleo.
- . Reinstalación de equipos en la fundición de S.P.C.C.

El análisis del incremento de la capacidad de producción de ánodos escapa a la intención del presente trabajo; sin embargo, las cifras anotadas indican que es factible, desde el punto de vista de materia prima, incrementar la producción de cobre refinado.

Un aspecto muy importante en una posible modificación del método de refinación, es la capacidad de las instalaciones eléctricas actuales, las cuales han sido proyectadas en alta y media tensión, contemplando la ampliación de la RCu por el método convencional con otra planta electrolítica de características similares a la actual.

El presente estudio tiene como objetivo el determinar los cambios y modificaciones necesarios en el sistema eléctrico de la RCu, tanto en corriente alterna como en continua, requeridos para la

TABLA 1. PARAMETROS IMPORTANTES DE REFINERIAS DE COBRE

	RUCO-110 PERU	Tanigoro JAPON	Takehana JAPON	Bolliden SUECIA	Hordausch Af. ALEMANIA	Damianov BULGARIA	Brixlegg AUSTRIA	Rfo-Tingo ESPAÑA
1. Aspectos generales								
Producción anual (T/año)	150,000	102,000	85,000	64,000	240,000	72,000	33,000	105,000
Eficiencia de corriente	93,5	95,0-96,0	94	94	94	95	90	94
Vol./T cátodo (Electrol. día)	280	300-350	305	300-500	300	350	430	400
Ti vapor/Ti cátodo	0,4	0,14	0,2	1,0		0,6	0,7	0,6
Número de naves	2	1	1	1	2	2	1	3
1.º sistemas de circulación	3	3	2	2	2	3	3	5
Número de secciones	48-4	20-2	44-62	26-4		48-4	34-3	20
N.º celdas/sección	16	18	7-7	14-14		10-14	10	17-19
Número de celdas	852	418	424-308	300-56	2,408	664	340	796
Producción de cátodos	768	352	372-308	280-56	54	664	310	688
Producción de láminas	44	36	62	28		42	30	68
Liberación de cobre	16-24	18-12		24			13	46
Dimensiones de celdas								
Longitud	4,830	4,860	3,800	4,640	3,200	3,850	2,490	4,100
Ancho	1,230	1,200	1,000	1,100	820	1,100	890	1,080
Profundidad	1250/1400	1250/1400	1,100	1,200	1,200	1,150	1,100	1,280
Materiales de construcción								
Estructura	Concreto	Concreto	Concreto	Concreto	Concreto	Concreto	Concreto	Concreto
Revestimiento	PVC	PVC Flex	PVC	Pb-Sb	Pb-Sb	Pb-Sb	Pb-Sb	Pb-Sb
Número de ánodos/celda	46	47	35	36	34	32	25	33
Número de cátodos/celda	47	46	34	37	33	33	26	34
Sist. de conexión eléctrica	Walker	Walker	Walker	Walker	Walker	Walker	Baltimore	Walker
Producción lodos Kg/TH cát.	0.5	7.2	5.7		3-6		9.1	
2. Anodos								
Para producción de cátodos								
Longitud mm	980	980	910	950		820	830	915
Ancho mm	960	960	690	875		820	760	910
Espesor mm	43	45	40	40		35	40	42
Peso Kg.	375	350	222	305		270	212	300
Vida días	28	20	20/16	20/16		18*	16	16
Retorno en corroidos %	16	15	16	18		16	16	16
Espaciamento mm	100	100	100	120	90	108	96	115
Para producción de láminas								
Longitud mm	1,040	1,040	910	1,030	920	950	900	1,040
Ancho mm	1,040	1,040	690	950	700	920	800	1,040
Espesor mm	43	42	40	40		43	40	40
Peso Kg.	420	390	232	330		363	245	335
Vida días	28	28	20	20		18	16	28
Retorno en corroidos %	16	15	22	22		16	16	16
Espaciamento mm	100	100	100	120		114	125	115
Análisis químico								
Cu %	99,7	99,6	99,5	98,5		99,3	98,8	99,4
O ppm	1,900	2,000	7,500	2,500		1,000	1500-3500	1,500
S ppm	30	50-80				100		30
Au ppm	0,5	15-40		100			1,7	25
Ag ppm	274	400-600	400-600	2500-5000		300	280	775
As ppm	50	700-1200	500-800	2,000		500	700	1,480
Sb ppm	50	150-400	300-500	300-450		600	300	405
Se ppm	120			100		700		205
Fe ppm	30					300		55
Ni ppm	160	400-700		3,000		1,000	3,500	340
Pb ppm	30	500-2500		1,500		600	3,100	540
Bi ppm	5	50-100	80-130	100-200		5		25
Te ppm				200		250		
3. Producción láminas arranque								
Planchas madres								
Material	Cobre	Cobre	Cobre	Titanio	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre
Longitud	1,080	1,060	1,020	1,060	1,020	1,020	950	995
Ancho	1,080	1,080	640	1,000	740	940	820	990
Espesor	4	4	4	3	4	4	4	4
Deslaminante	Chelex+Jabón	Chelex+Jabón	Chelex+Jabón	Ninguno	Acetate	Acetate	Acetate	Acetate
Marcos, bordes	PVC	PVC	PVC	Ranura	Ranura	Ranura/Pb	Ranura	Plástico/Pb
Láminas								
Longitud mm	1,000	1,000	920	1,000	920	950	900	965
Ancho mm	1,000	1,000	620	960	700	920	810	960
Espesor mm	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
Peso Kg.	7,0	7,0	4,3	6,0	5,5	6,0	6,0	6,0
Producción/día	3,872	3,312	4,216	1,960	5,000	3,200	1,140	2,312
Electrolito								
Cu g/l	45	40	44	42	41	42	50	44
H2SO4	170	185	187	170	150	175	150	160
Cl	0.020	0.025	0.060	0.040	0.060		0.030	0.030
As	0.5	3.5-6.0	4.0	8-15	4.2		2.4	3.5
Sb	0.3	0.3-0.5	0.4	0.3-0.45	0.35	0.5	0.3	0.3
Fe	1.0		0.3					
Ni	5.0	12-15	11	15-20	12		18,20	8
Te								
Circulación lt/min	25	20 B T	20 B T	16 B T			15 B T	20 B T
Temperatura °C	63	55	55	62	62	62	60-65	62
Aditivos								
Cola gr/TH	40			65			115-140	
Thiourea gr/TH	33						50	
Avitone gr/TH								
Amperaje A/tp.	19,600	20,240	14,960	16,500	18,750	13,500	15,770	23,100
Densidad corriente A/m2	214	220	222	245	250	260	290	350
Voltaje/celda mV	280	280	290	300	300	350	500	
4. Producción de cátodos								
Peso Kg.	165	150	85			140	60	120
Vida días	14	9-10	9-10	8		9	4-6	8
Análisis químico								
Cu %	99.99	99.99	99.99	99.9	99.95	99.99	99.95	99.99
O ppm	70					200		
S	6					10		10

Ag	7	6-10	6-10	12-14		7	10	5
As	1	1	1	20		1	1	1
Sb	1	1	1	1.3		1	1	0.5
Fe	1	2	2	0.3		3	3	0.5
Ni	1	1	1	1.5		3	3.7	1
Pb	1	1	1	2.5		2	4	1
Bi	1	1	1	0.3		0.1	1	1
Te	1	1	1	0.3		1	0.9	
Se	1	0.5	1	1.0		2	0.9	0.5
Electrolito								
Cu gr/lt	40	44-48	44	40-43	41	40	44	40
H2SO4	180	180-200	187	170	160	170	170	175
Cl	0.025	0.030	0.060	0.040	0.060	0.040	0.03	0.035
As	0.8	3.5-6.0	4	8-15	4.2	5.2	2.4	5.0
Sb	0.34	0.3-0.5	0.4	0.3-0.45	0.35	0.35	0.3	0.3
Fe	1.3	0.06-0.1	0.3					
NI	7.0	12-15	11	10	12.0	8	10-20	2
Te	0.0004							
Flujo lt/min	23	40 T B	20 T B	16 B T	16 B T	20 B T	20 B T	20 B T
Temperature °C	63	65	60-65	62	60	63	60-65	63
Aditivos								
Cola	35	120	109-82	65	-		115-140	
Thiourea	70	70	96-64	35	-		50	
Avitone				10	-			
Amperaje Amp.	19,600	31,740	15,000	21,000	18,750	13,500	18,500	23,100
Densidad corriente A/m2	214	345	310	330	250	350	370	350
Rectificadores								
Producción cátodos								
Número	01 CD	01 CPR	02 CPR	01 FRC	01 CD	01	02 CPR	01 CPR
Tipo	Thyristor	Thyristor	Thyristor	Thyristor	Diodo	Thyristor	DRG/ABG	Thyristor
Potencia KW	6,930	5,440	2,160	4,480		3,500	1875/2550	7,800
Capacidad Amp.	21,000	32,000	18,000	22,400	18,750	13,500	12500/15000	26000
Voltaje	330	170	120	330		245	150/170	300
Producción de láminas								
Número	El mismo III	01 CD	01 CD	01 CD				
Tipo		Thyristor	Thyristor	Silicon				
Potencia KW		4,500	3,000	4,000				
Capacidad		22,500	15,000	16,650				

NOTA: Hay datos que no ha sido posible conseguir, a veces por ser confidenciales y otras porque la información no se proporcionada a tiempo durante los escasos lapsos de permanencia en cada refinería, ya que no todas las empresas tienen preparada la hoja de datos operativos.

implementación de la CPR.

Se propone el sistema de rectificadores a utilizarse y finalmente se realiza un análisis comparativo técnico y económico.

Es importante resaltar que no se tocará el aspecto fuerza motriz en detalle, ya que los requerimientos específicos en cuanto a circulación del electrolito no han sido definidos plenamente; sin embargo, para el análisis global, se hará un estimado de los requerimientos, basados en las pruebas a nivel de laboratorio.

Como se explicará más adelante, las modificaciones requeridas en el sistema motriz son mínimas, debido a que el incremento de producción y el consecuente mayor movimiento de material, se realiza a expensas del incremento del factor de utilización de planta. De lo anterior se infiere que el aspecto más importante del presente estudio en cuanto a modificaciones, se refiere a corriente continua y corriente alterna en media y alta tensión.

1.2. Proceso electrolítico en CD y CPR

1.2.1. Refinación electrolítica del cobre mediante el uso de corriente directa

De acuerdo a la Ley de Faraday, se establece la relación - entre la cantidad de electricidad fluyendo por una celda electrolítica y la cantidad de material liberado:

$$W = \frac{E I t}{96,496} \quad (1.1)$$

Donde W = Peso en gramos

E = Peso equivalente Peso atómico/Valencia

I = Corriente, amp.

t = Tiempo, seg.

En forma práctica para la RCu:

$$TM = 3.2944 \times 10^{-10} \times I \times N^{\circ} c \times t \quad (1.2)$$

Donde N° c = N° de celdas = 768

En la fig. 2 está esquematizada una celda electrolítica. El electrodo con potencial positivo (Anodo) se disuelve - por acción de la corriente eléctrica, depositándose en el electrodo negativo (Cátodo). Por este método, las impurezas presentes en el ánodo, ya sea que se disuelvan o mantengan insolubles, no se depositan en el cátodo. Mediante este método, se logra gran pureza en el cátodo (99.99%)

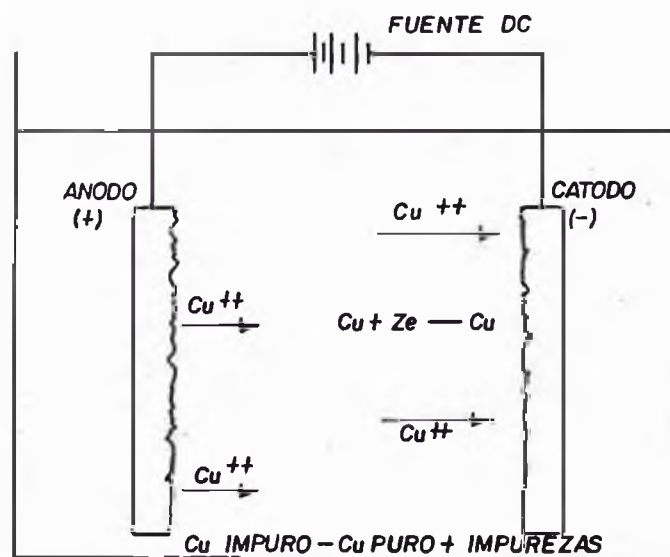


Fig. 2 Esquema de celda electrolítica

Las reacciones que ocurren en los electrodos durante la electrólisis, pueden ser clasificadas de diferentes maneras, dependiendo del punto de vista. Uno de ellos es:

1. En el cátodo
 - a. Deposición del cobre
 - b. Evolución del hidrógeno
 - c. Reducción electrolítica
2. En el ánodo
 - a. Disolución del cobre
 - b. Evolución del oxígeno y otros aniones
 - c. Oxidación electrolítica

1.2.2. Eficiencia de corriente

En la práctica, se encuentra que la cantidad de cobre electrolítico depositado por la acción de una determinada cantidad de corriente, es menor que el equivalente electroquímico teórico. Esto se debe a que no se toman en cuenta todas las reacciones que ocurren en los electrodos (Por ejemplo, la liberación de hidrógeno en el cátodo u oxígeno en el ánodo). Tampoco se toma en cuenta el efecto de cortocircuitos entre electrodos y las fugas de corriente.

Luego, la eficiencia de corriente del proceso es:

$$\mathcal{E} = \frac{W_r \times 100}{W_t} \quad (1.3)$$

Donde W_r = Peso real obtenido en la electrodeposición

W_t = Peso teórico según la ley de Faraday

\mathcal{E} = Eficiencia de corriente en %

Densidad de corriente. Se calcula dividiendo el amperaje DC aplicado a las celdas electrolíticas entre el área de los electrodos; luego:

$$D = \frac{I}{N \times A_p} \quad (1.4)$$

Donde I = Corriente DC aplicada al circuito (Amperios)

A_p = Area promedio de los cátodos (m²)

N = Número de cátodos por celda

D = Densidad de corriente (A/m²)

El valor de densidad de corriente varía entre las plantas industriales de 150 a 250 A/m² de acuerdo a las condiciones de proceso. El rango de densidad de corriente, en el cual las reacciones son satisfactorias, depende de la temperatura, grado de agitación y concentración de la solución, calidad del ánodo y otros factores específicos.

A medida que se incrementa la densidad de corriente, se producen efectos adversos al proceso. En el cátodo, la calidad del depósito se deteriora, en el ánodo se produce pasivación (No se disuelve) con desprendimiento de oxígeno y el ánodo no cumple la función de proporcionar el contenido metálico en la solución, afectándose adversamente el proceso.

Efecto de la temperatura. La resistividad del electrolito disminuye con el incremento de la temperatura de tal forma que el efecto de calentamiento producido por la corriente, tiende a ser acumulativo siempre que el voltaje es constante. Ya que la temperatura afecta las propiedades del electrolito, es de considerable interés mantenerla constante.

Resistencia y conductividad del electrolito. El sistema electroquímico consiste en dos conductores electrónicos en contacto con el electrolito, el cual se caracteriza por la presencia de iones móviles. Sin considerar el fenómeno de potencial en la interfase metal-electrolito, sigue la Ley de Ohm

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1.5)$$

La conductancia equivalente del electrolito está dada por:

$$\kappa = \sigma v_e = \sigma \frac{Me}{d} \quad (1.6)$$

$$\text{También: } \kappa = \kappa_+ + \kappa_- \quad (\text{Ley de Kohlrausch's}) \quad (1.7)$$

$$Y \quad : \quad I = \frac{C}{1,000} (\kappa_+ + \kappa_-) \frac{V}{l} A \quad (1.8)$$

Donde I = Corriente (Amperios)

ρ = Resistividad

σ = Conductividad = $1/\rho$ ($\text{Ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$)

l = Longitud

A = Area

Ve = Volumen de un gramo equivalente de electrolito

Me = Masa

d = Densidad

\mathcal{K} = Conductancia equivalente iónica ($\text{Ohm}^{-1} \text{cm}^2 \text{Veq}^{-1}$)

\mathcal{K}_+ = Conductancia catiónica (Idem)

\mathcal{K}_- = Conductancia aniónica (Idem)

C = Concentración (Gramos equivalentes por litro)

Voltaje en la celda electrolítica. Cuando una corriente neta pasa por los electrodos, se presenta un potencial opuesto a la dirección de la corriente. El potencial presentado es llamado sobrepotencial, encontrándose el electrodo "po-larizado". El incremento de la corriente genera un incremento en el sobrepotencial e, invirtiendo la corriente, se producirá un sobrepotencial de signo opuesto, aunque no necesariamente del mismo valor.

El voltaje de celda resulta entonces de la suma de 3 componentes en el proceso irreversible:

$$V_c = I R + N_a + N_c \quad (1.9)$$

Donde V_c = Voltaje de celda

I = Corriente aplicada

N_a = Sobrepotencial anódico

N_c = Sobrepotencial catódico

Los valores de N_a y N_c se encuentran en forma experimental. Para nuestro caso, es de interés el voltaje total de la celda, a fin de determinar los parámetros eléctricos asociados.

Los experimentos demuestran que el incremento de la densidad de corriente va acompañado de un rápido crecimiento de potencial de la celda, limitando la cantidad de corriente

a aplicar y el normal desenvolvimiento del proceso. Sin embargo, la inversión periódica de la corriente obvia este problema dentro de ciertos límites, pudiendo incrementarse la densidad de corriente y la capacidad productiva.

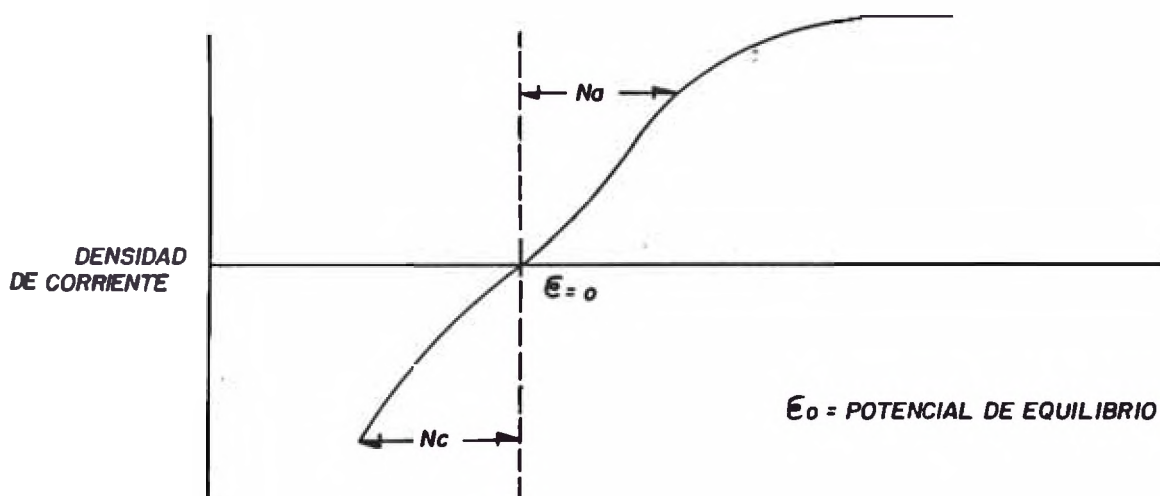


Fig. 3 Curva de polarización

1.3. Refinación electrolítica del cobre mediante el uso de la Corriente Periódica Reversible

1.3.1. Introducción

La refinación con altas densidades ha sido utilizada desde 1,948 en galvanotecnia; sin embargo, para la refinación de metales, su introducción ha sido relativamente reciente.

El desarrollo para un nuevo método de refinación electrolítica del cobre fue iniciado por BOLIDEN AB y el Departamento de Electroquímica del REAL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTOCOLMO en 1,952, donde se utilizó la CPR por primera vez en el mundo, para este fin. Las pruebas arrojaron buenos

resultados; sin embargo, no fue posible disponer de un e quipo adecuado para CPR. Con el advenimiento del tiristor en los años '60, se construyó un rectificador adecuado para la aplicación de la CPR a gran escala en Bulgaria. Las investigaciones fueron efectuadas en la REFINERIA G. DAMIA NOV y el proceso la patentó TECHNICA de Bulgaria.

El proceso CPR, posteriormente ha sido estudiado y adoptado por varias refinerías de cobre. Así, tenemos que en 1,969 fue aplicada por la BO^TH OF ROAN CONSOLIDATES MINES LTD., Mufulira, Zambia, Africa. En 1,972 por la TAMANO SMELTER, Japón. En 1,973 por la BOLIDEN, Suecia, y en 1974 por la REFINERIA DE RIO TINTO en España.

1.3.2. Fundamento

Esta técnica se caracteriza por un flujo alternado de corriente DC en la electrólisis. A fin de mantener la eficiencia de corriente lo más alta posible, la duración de la corriente inversa es tan corta como sea posible. La intensidad de la corriente eléctrica directa o inversa puede ser igual o distinta, dependiendo del tipo de fuente y del modo en que la produce. Pero en la mayoría de los casos, una onda rectangular es la más apropiada. Los valores de esta relación están en un rango de 10 a 40.

La relación escogida para un caso concreto, depende de las condiciones de aplicación del proceso, tales como composición de ánodos, densidad de corriente, requerimientos relacionados con los métodos y otros factores.

La duración del ciclo y la intensidad de corriente son dos factores importantes en la determinación de la potencia elétrica. Como regla general, al incrementar la densidad de corriente, se debe operar con una relación más pequena.

1.3.3. Impacto del proceso CPR en la calidad de los cátodos

Principio básico

Se basa en la secuencia continua de 2 pulsos de corriente CD. Durante el ciclo directo, se produce la electrodeposición de la misma manera que el proceso con CD, la concentración de iones en la vecindad de los cátodos se vuelve más pobre y los cátodos se vuelven aún más básicos hasta que la polaridad es cambiada. Durante el ciclo inverso, el cátodo se comporta como ánodo y se vuelve más noble.

La diferencia de concentración entre el electrolito principal y el catolito, es compensada debido a los siguientes procesos:

- . Difusión de iones cobre del electrolito principal en el área del cátodo.
- . Redisolución de iones cobre de cátodo que actúa como ánodo durante el ciclo inverso.

Principalmente, el sobrevoltaje catódico se minimiza en el proceso CPR.

Calidad de los cátodos

- . El catolito tiene una mayor concentración de iones, comparado con el proceso CD sin la necesidad de incrementar la temperatura o la circulación del electrolito.

El cátodo muestra potenciales negativos menores que el proceso CD, lo cual resulta que menos o ningún ión básico diferente del cobre es depositado.

- . Durante el ciclo inverso, el cátodo se comporta como ánodo. El pequeño número de iones básicos precipitados regresan a la solución, siguiendo un conocido principio químico, lo cual resulta en un efecto de purificación en los

cátodos.

- La cristalización del cobre se interrumpe a cada detención del ciclo directo y se originan nuevos al siguiente cambio de corriente. De esta manera, se consigue un grano muy fino y el lodo y electrolito como impurezas son mantenidos en un nivel bajo.
- Durante los ciclos inversos, los crecimientos dendríticos son disueltos, contribuyéndose a obtener superficies, más suaves, por un lado, y evitándose los cortocircuitos y uniformizándose la distribución de corriente por otro lado.
- El proceso CPR previene la pasivación anódica en alto grado. Todos los fenómenos negativos atados a la pasivación en particular, la extracción del cobre en el curso de pasivación y la rugosidad de la superficie del cátodo, son minimizados.
- Pueden producirse cátodos de alto grado de pureza en soluciones altamente contaminadas, ya que los sobrevoltajes en los cátodos pueden ser mantenidos tan bajos que los potenciales de deposición de los iones básicos no llegan a alcanzarse.

1.3.4. Relaciones entre corriente efectiva y corriente aplicada

La fig. 4 muestra un ciclo CPR típico, a partir del cual se obtienen las relaciones que utilizaremos en los próximos capítulos.

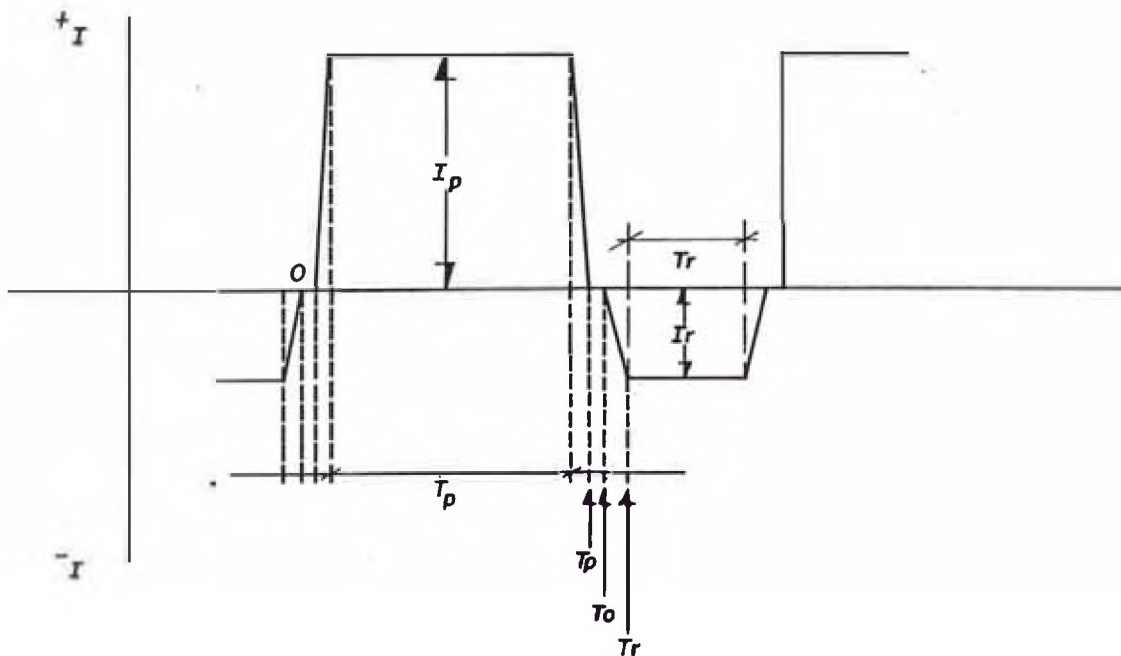


Fig. 4 Ciclo CPR típico

I_p = Corriente positiva

I_r = Corriente negativa

T_p = Tiempo de corriente positiva

T_r = Tiempo de corriente negativa

t_p = Tiempo de retardo en el ciclo positivo

t_r = Tiempo de retardo en el ciclo negativo

t_o = Tiempo sin flujo de corriente

La corriente efectiva I_e está dada por la siguiente ecuación:

$$I_e = \frac{T_p + t_p}{T_c} \cdot I_p - \frac{T_r + t_r}{T_c} \cdot I_r \quad (1.10)$$

Donde t_c es el tiempo de duración del ciclo completo

$$t_c = T_p + T_r + 2t_p + 2t_r + t_o \quad (1.11)$$

La eficiencia del ciclo E es:

$$E_c = \frac{I_e \times T_c \times 100\%}{I_p (T_p + t_p) + I_r (T_r + t_r)} \quad (1.12)$$

Finalmente, la densidad de corriente efectiva es:

$$D_{ef} = I_{ef}/A \quad (1.13)$$

Normalmente, se usan niveles de corriente iguales en ambos sentidos; luego:

$$I_p = I_r = I \quad \text{También } t_p = t_r = t$$

Y en fórmulas (1.10) y 1.12)

$$I_e = \frac{(T_p - T_r)}{T_c} I$$

$$E_c = \frac{I \left(\frac{T_p - T_r}{T_c} \right) \times T_c \times 100\%}{I (T_p + T_r + 2t + t_0)} = \frac{T_p - T_r}{T_c} \times 100\%$$

1.3.5. Refinación con CPR en la Refinería de Cobre de Ilo

Antecedentes. Conocedores de la existencia de la refinación con CPR, el área metalúrgica de la Unidad efectuó pruebas con un inversor mecánico a pequeña escala, llegando a valores altos de corriente a fines de 1,981.

1.3.5.1. Nivel laboratorio

Las pruebas de laboratorio efectuadas con densidades de corriente de 300 a 500 amperios/m², demonstraron que el cobre anódico y el electrolito de la Refinería de Cobre de Ilo se pueden adaptar a este nuevo proceso, incrementando la producción y manteniendo la calidad física y química del cátodo.

Los análisis químicos del cobre producido con CPR, no fueron diferentes a los valores obtenidos con CD.

Finalizadas las investigaciones de CPR a nivel de laboratorio, se concluyó en la necesidad de disponer de un módulo piloto en donde se puedan utilizar electrodos convencionales; es decir, los mismos que se utilizan en las celdas comerciales. Los resultados de las pruebas a nivel piloto proporcionan información sobre lo siguiente:

- . Nivel de aditivos a utilizarse
- . Comportamiento de contactos
- . Necesidades de circulación
- . Eficiencia de corriente
- . Densidades de corriente adecuadas y eficiencia del ciclo más conveniente.
- . Calidad obtenible de cátodos comerciales.

1.3.5.2. Módulo piloto

A inicios de 1,983, ante una solicitud de MINERO PERU S.A., ONUDI aprobó una donación de US\$59,000 para el desarrollo de la etapa piloto del Proyecto de Corriente Periódica Reversible, partida destinada a solventar gastos de asesoría técnica, - viajes de estudio del personal técnico de MINERO PERU, y la compra de algunos equipos afines.

A fines de 1,985 se concluyó con los trabajos civiles, instalación del rectificador CPR (SIEMENS), barras de conducción de corriente (BUSBARS) y equipos auxiliares (Bombas, instalación de vapor, circulación de electrolito, control de temperatura, etc.). Inmediatamente se dio inicio a las pruebas, a fin de determinar los parámetros anteriormente señalados. Previamente se desarrolló un programa de cooperación técnica ONUDI. Este pro

grama tuvo inicio con la contratación de los servicios de asesoría del Dr. Rolf Malmstrom, de nacionalidad finlandesa, quien permaneció 5 días en la RCU a partir del 11.02.84, efectuándose las coordinaciones preliminares para el desarrollo del programa.

Durante el mes de junio de 1,984, 3 ingenieros viajaron al extranjero para cumplir visitas técnicas a siete refinerías de cobre en Japón y Europa, - seis de las cuales trabajan con CPR.

Pruebas piloto CPR

El circuito CPR utilizado en las pruebas piloto , se muestran en la fig. 5 y los parámetros importantes del rectificador se detallan en la siguiente tabla.

Resultados de las pruebas piloto CPR

Los principales objetivos en la ejecución de las pruebas a nivel piloto, son los siguientes:

- . Determinación de la máxima capacidad alcanzable de producción en base a la calidad catódica actual que debe ser conservada (Super cátodos 99.99% puros).
- . Determinación de los valores óptimos de:
 - . Factor de reversión: $\text{Tiempo positivo} / \text{Tiempo negativo}$
 - . Eficiencia de ciclo
 - . Densidad de corriente
 - . Densidad de corriente efectiva
- . Evaluación de los valores de consumo de energía eléctrica y comportamiento eléctrico del circui

TABLA 2. PARAMETROS IMPORTANTES DEL RECTIFICADOR PILOTO CPR

VALORES NOMINALES

Potencia DC (Inversa y Directa) nominal	:	48 KW
Voltaje DC nominal	:	8 V
Corriente DC nominal (Directa e inversa)	:	6,000 A
Voltaje AC nominal	:	440 V
Frecuencia nominal	:	60 Hz
Fases	:	3
Pulsos	:	6

TRANSFORMADOR

Tipo	:	Inmerso en aceite ONAN
Capacidad	:	86 KVA
Frecuencia	:	60 Hz
Voltaje primario nominal	:	440 V
Voltaje secundario nominal	:	11.7 V

RECTIFICADOR A TIRISTORES

Tipo	:	A tiristores, enfriamiento agua (Ciclo cerrado) aire (Radiador)
Corriente DC nominal	:	6,000 A
Número de fases	:	6
Número de tiristores	:	12
Accesorios	:	Fusibles ultra rápidos, fusibles señalizadores, protección contra sobretensión, alarmas de temperatura y bajo flujo de agua.
Modalidad de operación	:	Control automático y manual de corriente. Variación del voltaje de alimentación mediante autotransformador motorizado. Inversión temporizada de corriente y control de duración de proceso de 0 a 3 horas.

to.

Los valores de los principales parámetros operativos se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 3. PRINCIPALES PARAMETROS OPERATIVOS (1)

PARAMETROS	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4
Tiempo ciclo (seg)	213	213	213	213
Tiempo directo (seg)	202	202	202	202
Tiempo inverso (seg)	10	10	10	10
tc/tr	21	21	21	21
Efic. ciclo (%)	90.1	90.1	90.1	90.1
Densidad (A/m ²)	287.1	299	313	355
Dens. Ef. (A/m ²)	260	270	282	320
Incremento de producción (%)	21.5	25.5	30.4	39
Vol. directo (mv)(2)	305	318	350	387
Vol. inverso (mv)(2)	240	258	260	280
Consumo energía (KWh/TM)	254.5	265.7	291.5	349.4
V (mv) busbar y crossbar	12.31	12.5	12.55	14.6
Eficiencia corriente(3)	95%	94.5%	94%	93%

(1) Se muestran las pruebas más significativas

(2) Valores promedios

(3) Datos RCu y TAMANO SMELTER

El valor máximo de densidad efectiva alcanzable , sin afectar las características de los cátodos es algo superior a los 320 A/m² efectivos; sin embargo, otros factores limitantes determinan el valor óptimo. Entre ellos tenemos:

. Suministro de materia prima.

- . Disminución de la eficiencia de corriente con el incremento de densidad (Cortocircuitos en los electrodos).
- . Incremento del consumo de energía eléctrica y limitaciones en las instalaciones.
- . Problemas operacionales (Flujo de electrolito, composición química, inspección de celdas, problemas en la resistencia de contacto, etc.).

Las desventajas potenciales que pueden estar ligadas a la introducción de la CPR son, de hecho, una extensión de los problemas que pueden ocurrir con DC. Cualquier incremento en la corriente debido a CPR, está sujeto a pérdida si bajan las eficiencias de corriente. Esto depende principalmente de la experiencia en la inspección y la atención prestada a los detalles operativos. Existe una eficiencia de corriente óptima sobre la cual el esfuerzo requerido para mejorarla incurre en un costo marginal que no justifica el incremento de producción.

Basado en la experiencia a nivel internacional, propia experiencia y el análisis de los factores anteriormente descritos (Fuera del objetivo de este trabajo), se ha determinado 320 A/m² efectivos como intensidad de trabajo y sobre la cual desarrollaremos la presente monografía.

1.3.5.3. Principales parámetros CPR

1. Incremento en la capacidad de producción (ICP)

$$ICP = \left(\frac{D(CPR)}{D(DC)} \times \frac{\epsilon(CPR)}{\epsilon(DC)} \times \frac{UP(CPR)}{UP(DC)} \times \frac{\epsilon_c(CPR)}{\epsilon_c(DC)} - 1 \right) 100\%$$

(1.14)

Donde:

Parámetro	DC	CPR
D = Densidad de corriente (A/m ²)	214	355
ϵ = Eficiencia de corriente	0.95	0.93*
UP = Utilización de planta	0.95	0.90*
ϵ_c = Eficiencia de ciclo	1.00	0.9014

* SELTRUST ENGINEERING y TAMANO REFINERY

Luego:

ICP = 38.7% (Incremento de producción: 58,000
TM/Año)

2. Características eléctricas

2.1. Potencial de celda

En la fórmula (1.9) vimos que:

$$V_c = IR + N_a + N_c$$

El alto valor de corriente produce un incremento del voltaje de celdas con el tiempo (Mayor incremento en el tiempo directo), al incrementarse los sobrepotenciales en los electrodos Na y Nc. La fig. 6 muestra la variación en los voltajes directo e inverso con el tiempo, obtenido a una densidad de 320 A/m² efectivos.

Densidad efectiva : 320 A/m².

Voltaje directo máximo: 0.387 V DC

Voltaje directo mínimo: 0.328 V DC

Voltaje inverso máximo: 0.294 V DC

Voltaje inverso mínimo: 0.275 V DC

2.2. Potencia DC

Presenta la misma característica de volta

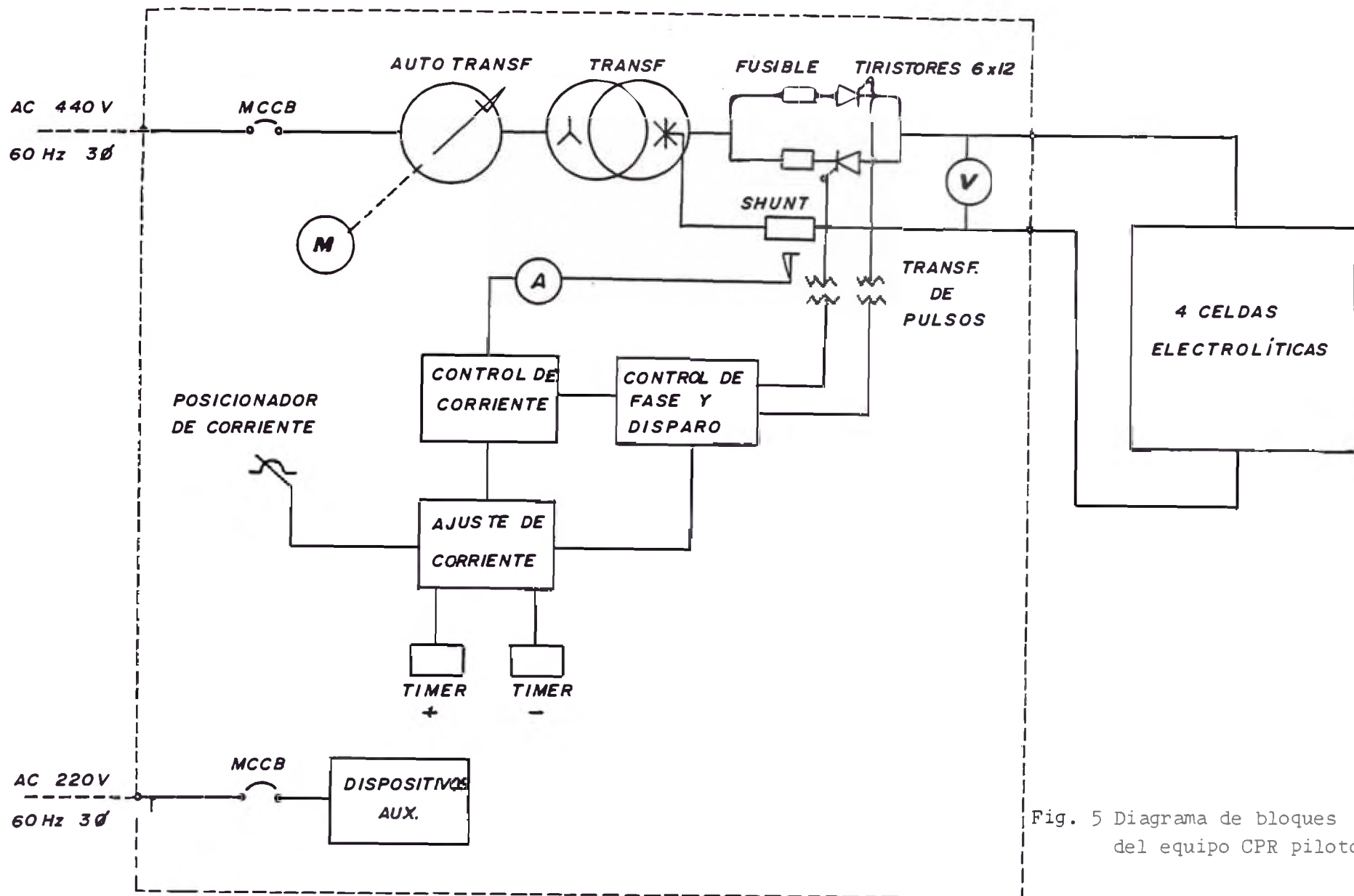


Fig. 5 Diagrama de bloques del equipo CPR piloto

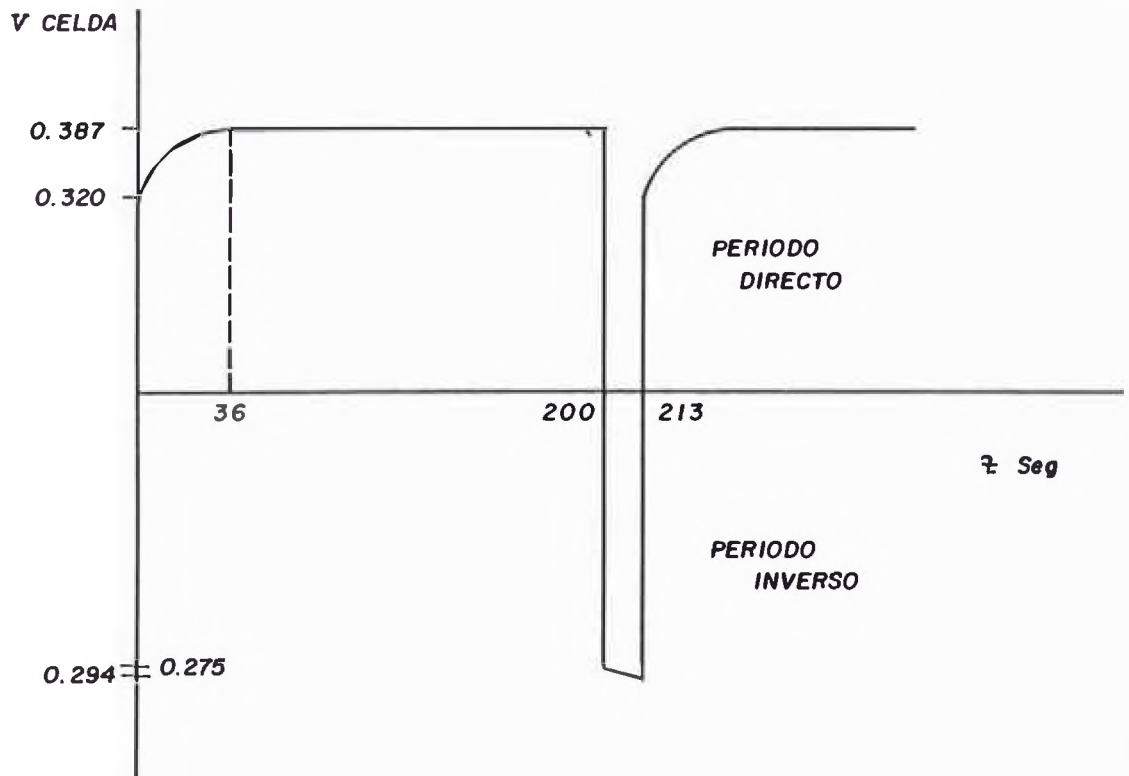


Fig. 6 Voltajes de celda CPR
en períodos directo e inverso para $I_{ef} = 320 \text{ A/m}^2$

je, si consideramos la corriente constante, a excepción de ser positiva.

2.3. Potencia AC

Será analizada posteriormente. Cabe adelantarse que se esperan variaciones en el factor de potencia debido a las variaciones de voltaje (Y potencia DC) y a que el equipo a utilizarse es tiristorizado y con control automático de corriente.

2.4. Energía eléctrica

El incremento de consumo de energía en TM de cátodos se debe a:

- . Incremento en el voltaje de celda.
- . Aumento en la caída de tensión en contactos.
- . Pérdida de eficiencia en el proceso.

No se considera un incremento por pérdidas en las barras de alimentación (Por TM de cátodo), ya que, básicamente, la densidad de corriente (En las barras) permanece constante.

El consumo de energía por TM será para DC:

$$E(\text{DC}) = \frac{I(\text{DC}) \times V(\text{DC}) \times t}{\text{TM}} ; \text{ para CPR:}$$

$$E(\text{CPR}) = \frac{I(\text{CPR}) \times V(\text{CPR}) \times t}{\text{TM}}$$

La producción de cobre refinado en ambos casos es:

$$\text{TM}(\text{CPR}) = \frac{E \times I(\text{CPR}) \times t}{96,496} \times \mathcal{E}(\text{CPR}) \mathcal{E}_c(\text{CPR})$$

$$\text{TM}(\text{DC}) = \frac{E \times I(\text{DC}) \times t}{96,496} \times \mathcal{E}(\text{DC}) \mathcal{E}_c(\text{DC})$$

Para una misma cantidad de cobre depositado en tiempo t:

$$I(\text{CPR}) \times \mathcal{E}(\text{CPR}) \times \mathcal{E}_c(\text{CPR}) = I(\text{DC}) \times \mathcal{E}(\text{DC}) \times \mathcal{E}_c(\text{DC})$$

$$\frac{I(\text{CPR})}{I(\text{DC})} = \frac{\mathcal{E}_{\text{DC}} \times \mathcal{E}_{c\text{DC}}}{\mathcal{E}_{\text{CPR}} \times \mathcal{E}_{c\text{CPR}}}$$

$$Y: \frac{E(\text{CPR})}{E(\text{DC})} = \frac{V(\text{CPR})}{V(\text{DC})} \times \frac{E_{\text{DC}}}{E_{\text{CPR}}} \quad (1.15)$$

Para la densidad de 320 A/m²

CPR (efectivo) y 214 A/m² DC

$$V(\text{CPR}) = \frac{V_p \times T_p - V_r \times T_n}{T_c} - \Delta V_{\text{Contactos}}$$

$$V(\text{CPR}) = 388.12 \text{ (Contactos húmedos)}$$

$$V(\text{CPR}) = 401.5 \text{ (Contactos secos)}$$

$$V(\text{DC}) = 280 \text{ mV}$$

$$E(\text{DC}) = 220 \text{ KWh/TM}$$

Luego, en (1.15)

$$E(\text{CPR}) = 345.6 \text{ KWh/TM (Contactos húmedos)}$$

$$E(\text{CPR}) = 357.5 \text{ KWh/TM (Contactos secos)}$$

La tabla 4 resume los valores de consumo de energía eléctrica DC y CPR

TABLA 4

	<u>Densidad</u>	<u>Energía DC</u>	<u>Energía DC a 95% eficiencia</u>
DC	214 A/m ²	220 KWh/TM	231.5 KWh/TM
CPR (1)	320 A/m ²	345.6 KWh/TM	363.1 KWh/TM
(2)	320 A/m ²	357.5 KWh/TM	376.3 KWh/TM

(1) Contactos húmedos

(2) Contactos secos

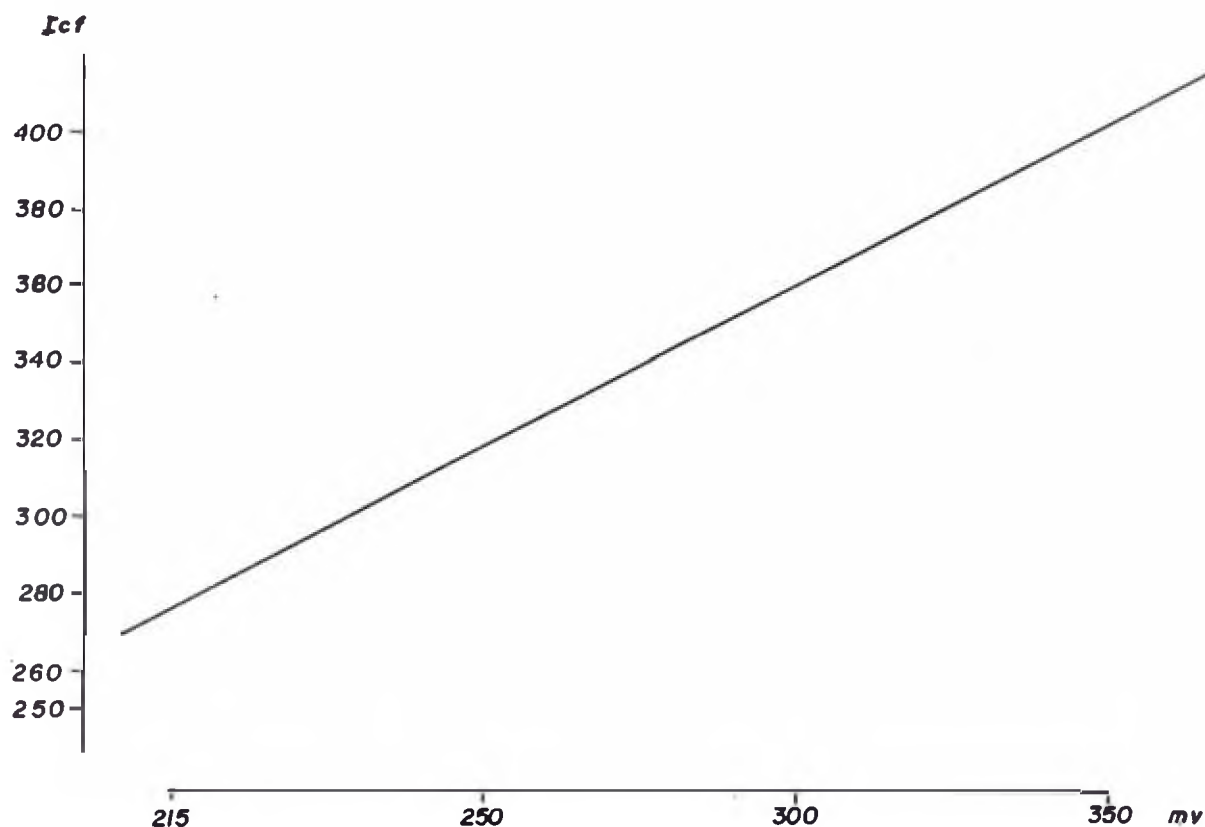


Fig. 7 Voltaje de celda en el período directo
Vs. la densidad efectiva CPR (Aprox.)

1.4. Conclusiones

1. La factibilidad de la ampliación de capacidad de producción, teóricamente ha sido demostrada, tanto en el aspecto materia prima como en las pruebas realizadas a nivel piloto. Igualmente, de importancia son las informaciones recibidas sobre el particular durante los períodos de visitas e intercambio técnico con otras plantas.
2. Las pruebas a nivel piloto han permitido establecer los valores óptimos de los parámetros más importantes en la refinación con CPR, los cuales serán utilizados en el desarrollo del tema.
3. El incremento en el consumo de energía eléctrica es sustancial. Para un incremento de producción del orden del 38.7%, tendríamos (Utilizando los valores prácticos):

• Contactos húmedos:

$$E \text{ CPR} = 350 \text{ kWh/TM} \quad E \text{ DC} = 220 \text{ kW/TM}$$

Si la potencia actual es de 7.2 MW, el incremento del consumo es del orden de:

$$P = \frac{7.2 \times 0.387 \times 350}{0.95 \times 0.9 \times 220} = 5.2 \text{ MW}$$

• Contactos secos:

$$P = 5.4 \text{ MW}$$

A los que habría que añadir las pérdidas por caída de tensión e instalación de equipos adicionales.

Sin embargo, dadas las condiciones especiales de diseño de la Refinería de Cobre de Ilo, se demostrará que los cambios más importantes no ocurren en el equipo de alta tensión, reduciendo grandemente la inversión en el proyecto y dándole un alto nivel de factibilidad.

4. Debido a las características de conmutación, el equipo más adecuado (Ver fig. 4), es un rectificador CPR a tiristores (SCR), en donde una característica resaltante es el control automático de la corriente continua requerida por el proceso metalúrgico.

CAPITULO II

ASPECTOS DE DISEÑO Y PARAMETROS ELECTRICOS DE LA REFINERIA DE COBRE
Generalidades. Alta y media tensión. Balance de energía AC. Energía DC.
Energía Reactiva. Conclusiones

2.1. Generalidades

La Refinería de Cobre de Ilo, inicialmente concebida para desarrollarse en dos etapas, fue eléctricamente dimensionada en alta y media tensión para absorber la segunda etapa y la erección de una planta de alambroón, proyectos que fueron postergados existiendo, por lo tanto, en la actualidad, una potencia disponible que puede ser utilizada en una ampliación de Corriente Periódica Reversible.

En el presente capítulo se presentan cuadros y planos de los equipos directamente relacionados con la utilización de la CPR.

2.2. Alta y media tensión

El plano 1 muestra el diagrama unifilar en alta y media tensión. En la tabla 5 se reseñan las características del equipamiento (Ver plano 1).

Los planos 2 y 3 muestran el sector de media tensión de interés - para la presente discusión. Como puede deducirse de los mismos, el sobredimensionamiento se da hasta el transformador de 8.5 MVA y sus interruptores asociados.

2.3. Balance de energía AC

El diagrama de carga típico de la Refinería se muestra en la fig. 8. La carga base corresponde principalmente a rectificadores y sistemas de bombeo, mientras que las puntas se deben a las operaciones realizadas con las máquinas de proceso (Grúas, sistemas de almacenamiento, etc.). Como carga base, la Refinería tiene a:

1. Rectificadores de 21 KA	4,430 KW
----------------------------	----------

2. Rectificadores de 12 KA	700 KW
3. Bombas de circulación	200 KW
4. Bombas de sistemas de refrigeración	200 KW
5. Planta desalinizadora	500 KW
6. Ventiladores	<u>700 KW</u>
	30 KW

TABLA 5. EQUIPAMIENTO TA CASA TANQUE

DISPOSITIVO	TE		OTROS
89R	1.	-	22KA (2 sec)
52R	1.	-	1A, 25KA
CTR	1.		15/5A entre líneas
CTR	1.		15/5A a tierra
89T	1.	-	22KA (2 seg)
TRR	-		10.5KV, 3 fases
52M		-), 18.4KA
52MT		-	18.4KA
52MS		-	18.4KA
52MC		-	, 18.4KA
TRM	-		CV, 3 fases
52F		-	DA, 31.5KA
52FT		-	, 31.5KA
52FTP		-	, 31.5KA
TRCT	-		.46KV, 3 fases

La máxima demanda es estadísticamente 7.2 MW y se muestra en la fig. 8 que ocurre en la noche (Iluminación).

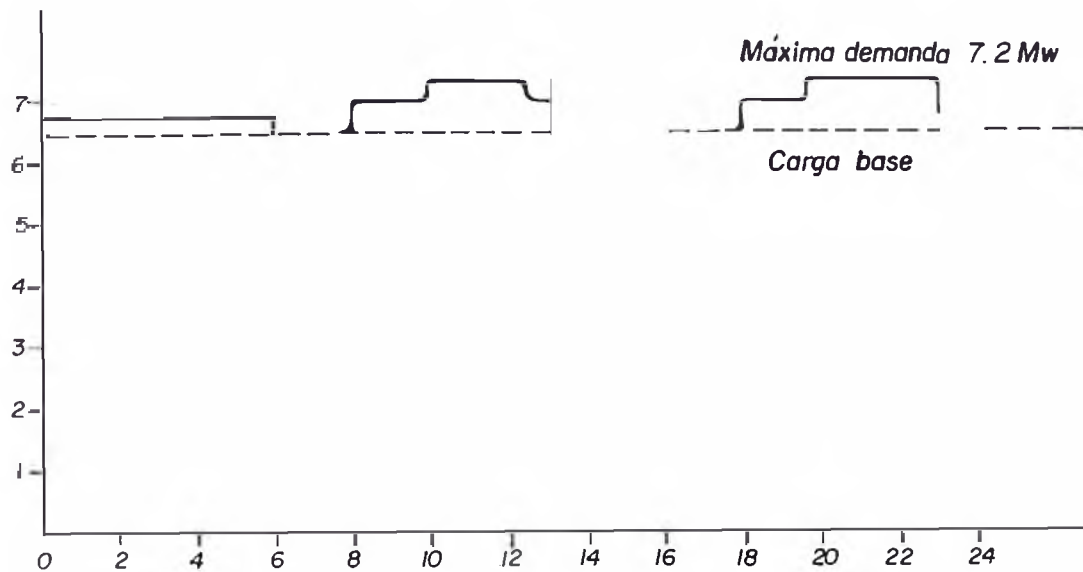


Fig. 8 Diagrama de carga diario RCU Ilo

Para un consumo promedio de potencia de 6.8 MW, el flujo de potencia en alta y media tensión es el siguiente:

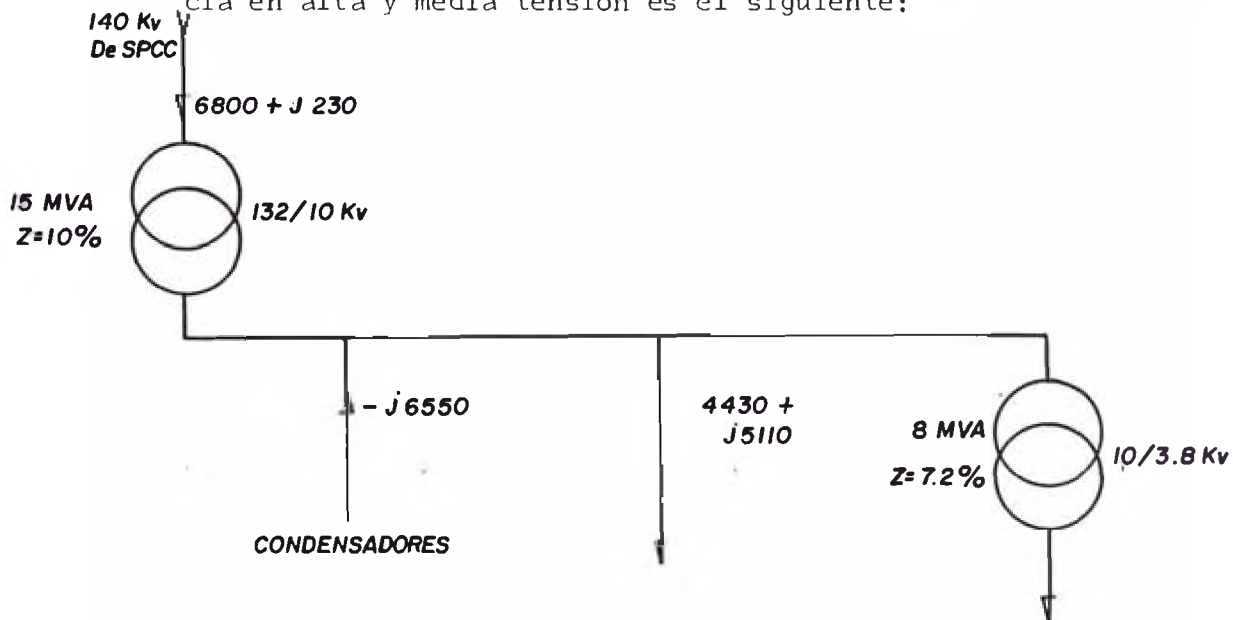


Fig. 9 Flujo de potencia RCU Ilo

Finalmente, en la siguiente tabla se muestra la disponibilidad del equipamiento de acuerdo con la tabla 5 y los planos 1 al 3.

TABLA 6. DISPONIBILIDAD DE EQUIPO PARA LA MAXIMA DEMANDA

DISPOSITIVO	CAPACIDAD NOMINAL	UTILIZADA		DISPONIBLE	
89R	800 A	29.8	A	770.2	A
52R	2,000 A	29.8	A	1,970.2	A
CTR	75 A	29.8	A	45.2	
CTRT	75 A	29.8	A	45.2	
89T	800 A	29.8	A	45.2	
TRR	15 MVA	7.215	MVA	7.785	MVA
52M	1,200 A	400	A	800	A
52MT	600 A	194	A	406	A
52MS	600 A	360	A	240	A
52MC	600 A	360	A	240	A
TRM	8,500 KVA	3,507	KVA	4,993	KVA
52F	2,000 A	472	A	1,528	A
52FT	600 A	200	A	400	A
52FTP	600 A	200	A	400	A
TRCT	2,500 KVA	1,315	KVA	1,185	KVA
CM *	6,000 KVAR	6,000	KVAR	-	

* La utilización del condensador está condicionada al pago de energía reactiva, la cual se busca sea cero en el balance general. Para tal efecto, se opera al rectificador con una tensión de alimentación superior a la requerida, como se verá en el capítulo III.

2.4. Energía DC

La potencia entregada a las celdas electrolíticas, según se observa en la tabla 7.

TABLA 7. DISTRIBUCION DE ENERGIA DC21 KA

CARGA	CELDA EN CONEXION	AMPERAJE (A)	VOLTAJE CELDA (mV)	VOLTAJE TOTAL (V)	POTENC. (KW)
Celdas comerciales	768 Serie	19,700	235	180.5	3,550.0
Celdas láminas arranque	44 Serie	19,700	280	12.3	242.3
Celdas 1ra. liberadora	24 Serie -paralelo	9,850	1,333	16.0	315.2
Busbar de cobre y contactos	-	19,700	-	16.7	330.0
T O T A L E S				225.5	4,437.5

2.5. Energía Reactiva

La potencia reactiva inductiva consumida por los rectificadores y resto de la planta, es compensada por el banco estático de condensadores, el cual se muestra en el plano 3. Las especificaciones - del condensador son:

Número de fases	3
Frecuencia, voltaje	60 HZ, 10 KV
Capacidad KVAR	6,000 KVAR
Corriente	346 A
Conexión	Estrella
Composición	24 juegos de 250 KVAR
Nivel de compensación del reactor serie	6% (360 KVAR)

El reactor serie opera con la quinta armónica (Producida por los equipos de rectificación), hasta un máximo del 35% del valor de la corriente fundamental y siempre que la corriente compuesta no exceda del 120% de la corriente nominal.

Sin embargo, el banco de condensadores no funciona actualmente a su voltaje nominal, debido a que la alimentación en alta tensión no es 132 KV. Operando a 10.45 KV, la potencia reactiva generada por el condensador es:

$$Q_r = \left(\frac{V_2}{V_N}\right)^2 \times Q_n = 6,550 \text{ KVAR}$$

Donde:

$$Q_n, 6,000 \text{ KVAR}$$

$$V_2, 10.45 \text{ KV}$$

$$V_N, 10 \text{ KV}$$

2.6. Conclusiones

1. Como puede deducirse del análisis anterior, existe una potencia disponible para la ampliación CPR de: $15-7.25=7.75$ MVA. Los dispositivos de conexión (Interruptores y seccionadores), se encuentran operando a menos del 50% de su capacidad, no representando ningún problema para su utilización en la ampliación a CPR.
2. Un caso particular es el de los interruptores 52 MS (Rectificadores 21 KA) y 52 MC (Condensador), los cuales operan bajo condiciones especiales, debido al sobredimensionamiento del condensador.
3. El diagrama de carga seguido actualmente, presenta una variación de $7,200-6,100\pm 1,100$ KW, el cual se espera no diferirá del que se lleve con la ampliación CPR.

Si suponemos una variación máxima de 1,500 KW, una adecuada compensación reactiva permitirá disponer de 11,600 KVA para alimentar a los rectificadores CPR, valor que se demostrará permite alcanzar el incremento de producción planteado en el capítulo I.

CAPITULO III

RECTIFICADOR CPR

Rectificador comercial actual. Valores de potencia activa y reactiva. Disposición del recorrido del busbar, problema de sobrevoltaje a tierra. Rectificador CPR. Aspectos generales. Consideraciones en la configuración CPR. Rectificador CPR. Potencia reactiva CPR. Conclusiones

3.1. Rectificador comercial actual

Las características del rectificador de 21 KA, se muestran en la tabla 8. La forma de onda de voltaje DC se muestra en la fig. 10, mientras que la corriente en el primario se muestra en la fig. 11.

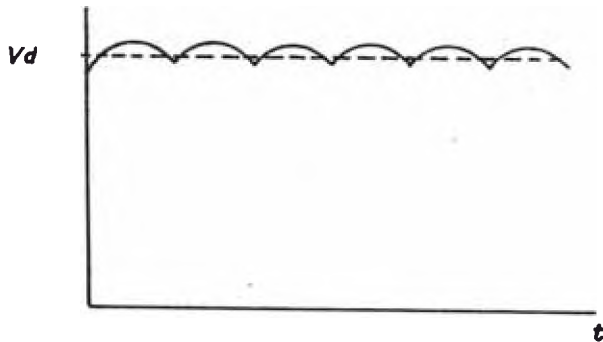


Fig. 10 Voltaje DC en rectificador comercial

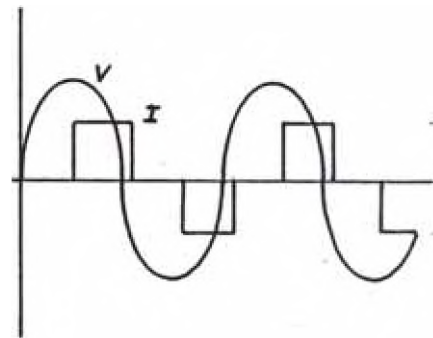


Fig. 11 Voltaje y corriente en el primario del transf.

Donde:

$$V_d = (3/\pi) \hat{V}_s \cos \alpha - I_d (3X_c/\pi) \quad (3.1)$$

$$X_c = \omega (L_p/h^2 + L_s) \quad (3.2)$$

(Significado de términos en tabla 9)

3.1.1. Valores de potencia activa y reactiva

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del convertidor son:

$$I_{rms} = 0.817 I_d/h \quad (3.3)$$

$$\cos \phi = \cos \alpha = r \quad (3.4)$$

TABLA 8. CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR - RECTIFICADOR COMERCIAL

Tipo de enfriamiento	OFAF		
Frecuencia	60 Hz		
	LADO AC	LADO DC	
Número de fases	3	4 x	3
Capacidad nominal	8,620 KVA	4 x	2,155 KVA
Voltaje nominal	10,000 V		290.3 V
Corriente nominal	498 A		4,286 A
Impedancia	6.41%		
CONEXION AC	CAMBIADOR DE TAP (POSICION)	VOLTAJE LADO DC	TERMINALES DC
DELTA	Delta 7	290.3	
	Delta 6	268.1	u1 v1 w1
	Delta 5	249.0	
	Delta 4	232.5	x2 y2 z2
	Delta 3	209.3	
	Delta 2	190.3	
	Delta 1	174.3	
ESTRELLA	Estrella 7	167.6	
	Estrella 6	154.6	u3 v3 w3
	Estrella 5	143.8	
	Estrella 4	134.2	
	Estrella 3	120.8	x4 y4 z4
	Estrella 2	109.9	
	Estrella 1	100.8	

CARACTERISTICAS DEL RECTIFICADOR

Servicio	Bajo techo
Tipo de enfriamiento	WFWF
Capacidad nominal	6,930
Corriente DC	21,000 A

TABLA 9. SIMBOLOS UTILIZADOS EN CIRCUITOS DE RECTIFICACION

V_s	Valor RMS fase a neutro en los terminales de entrada al rectificador
\hat{V}_s	Valor pico de V_s
V_n	Valor RMS fase a neutro en el primario del transformador
h	Relación de transformación
V_d	Valor promedio de voltaje DC bajo carga, a cualquier ángulo de disparo
$V_d \text{ máx.}$	Valor promedio máximo DC, obtenido a $\alpha = 0^\circ$
r	Relación de V_d a $V_d \text{ máx.}$
I_d	Corriente continua entregada por el rectificador
I_{rms}	Corriente alterna en el primario del transformador
L_s	Inductancia de conmutación en el secundario
L_p	Inductancia de conmutación en el primario
α	Angulo de disparo del rectificador, medido desde el punto en que el rectificador opera como si fuese no controlado
ϕ	Angulo de desfasaje entre la componente fundamental de la corriente del primario y el voltaje asociado línea a neutro
λ	Factor de potencia en un punto dado; relación de la potencia promedio a los amperios-voltios rms
X_c	Inductancia de conmutación referida al secundario
ω	Frecuencia angular de suministro

$$\lambda = 0.955 r \quad (3.5)$$

Para la operación normal del rectificador:

Posición del tap: Delta 4

I_d : 19,700 amperios

V_d : 225 VDC

Aplicando las fórmulas anteriores:

$$I_{rms} = 374.2 \text{ A}$$

$$N = 374.2 \times 10,450 \times 1.73 = 6,765 \text{ KVA}$$

$$f_p = \lambda = 0.955 \times 225 / (1.35 \times 243) = 0.655$$

En donde $N = 4,430 - j 5,110$

$$\phi = 49^\circ$$

3.1.2. Disposición física del recorrido de busbar y el problema de sobrevoltaje a tierra

La fig. 21 muestra el recorrido del busbar en el circuito electrolítico comercial, láminas de arranque y 1ra. liberadora. La fig. 12 muestra la distribución de voltajes a tierra desde el polo positivo al negativo del rectificador. El punto de cruce por el eje de las abscisas se ha dado en llamar "punto cero", el cual se ubica normalmente en el centro del circuito eléctrico de celdas y se tienen voltajes a tierra desde ambos polos del rectificador, siendo en los extremos $V_d/2 = 225/2 = 112.5 \text{ VDC}$.

Sin embargo, la pérdida de aislamiento en las celdas por falla o rotura del PVC de aislamiento, fugas de electrolito y deterioro de los sistemas de aislamiento de barras en general, producen fugas de corriente a tierra y el desbalance de los potenciales. Esta situación se vuelve crítica cuando se genera en el sector opuesto a la falla, un sobrevoltaje a tierra que conduce a la falla prematura del PVC en las otras celdas. En general, el tener potenciales

a tierra desbalanceados y las consiguientes fugas de corriente, conducen a la corrosión de los equipos de bombeo, tanques, etc., principalmente los ubicados en la nave central y que se encuentran en contacto con el electrolito.

Debido a la importancia de este problema en la elección adecuada del rectificador CPR, a continuación se presenta una breve discusión al respecto.

Voltajes a tierra en el circuito electrolítico

En forma simplificada, el circuito electrolítico puede representarse de la siguiente manera:

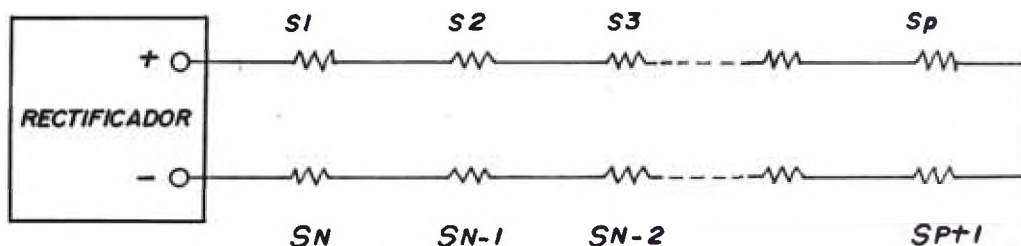


Fig. 12 Circuito electrolítico simplificado

Donde S1, S2..., Sn son las secciones o conjunto de celdas.

Si suponemos una resistencia a tierra concentrada para cada sección, tendríamos:

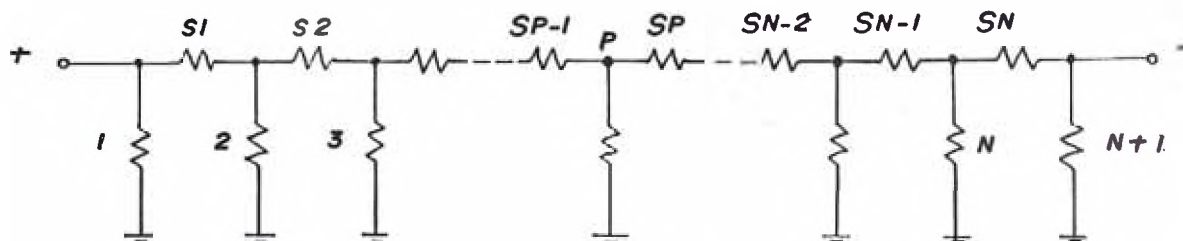


Fig. 13 Esquema de fugas a tierra suponiendo resistencias concentradas para cada sección

Pr suma de corrientes

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n + I_{n+1} = 0 \quad (3.6)$$

$$\circ \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots + \frac{V_n}{R_n} + \frac{V_{n+1}}{R_{n+1}} = 0 \quad (3.7)$$

Debido a que las secciones presentan la misma configuración

$$V_{s1} = V_{s2} = V_{s3} = \dots = V_{sn} = V_{sn-1} = V_s \quad (3.8)$$

$$\text{Es decir: } V_1 - V_2 = V_{s1} = V_s$$

$$V_2 - V_3 = V_{s2} = V_s$$

$$V_{n+1} - V_n = V_s$$

Las ecuaciones (3.6) y (3.7) pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} \sum (I^+) - \sum (I^-) &= 0 \\ \sum \left(\frac{V_i^+}{R_i}\right) - \sum \left(\frac{V_i^-}{R_i}\right) &= 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Si $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, el sistema se encuentra en equilibrio ($V_p = 0$); sin embargo, al presentarse una corriente de fuga adicional, según puede apreciarse en las ecuaciones (3.10), existe un incremento de corrientes en el sector opuesto a fin de cumplir con la igualdad o, visto de otra forma, el sector opuesto presenta voltajes a tierra más altos (Incrementándose la cantidad de puntos positivos) que el sector con falla. El potencial que presenta cada sección no es afectado por esta situación en gran proporción, debido a la gran corriente circulante y esta variación puede despreciarse. En las figuras 14 puede apreciarse el efecto.

$$\sum (I^+) - \sum (I^-) + I_f = 0$$

$$\sum \left(\frac{V_i^+}{R_i^+} \right) - \sum \left(\frac{V_i^-}{R_i^-} \right) + I_f = 0 \quad (3.10)$$

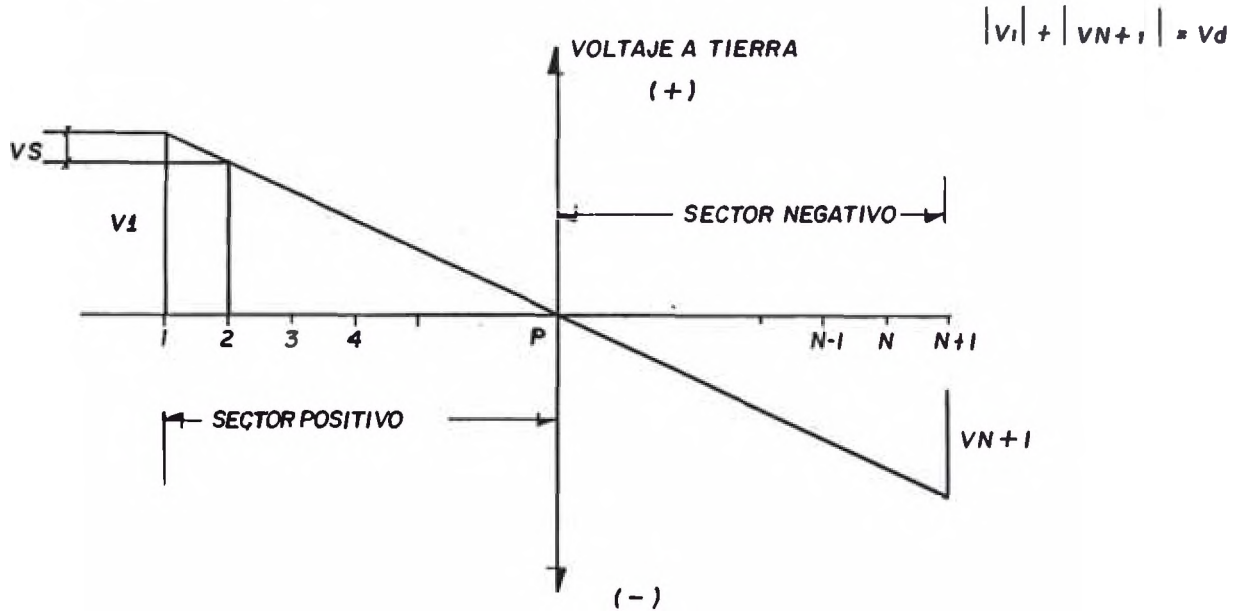


Fig. 14.1 Sistema equilibrado $R_1 = R_2 = R_3 \dots = R_n$

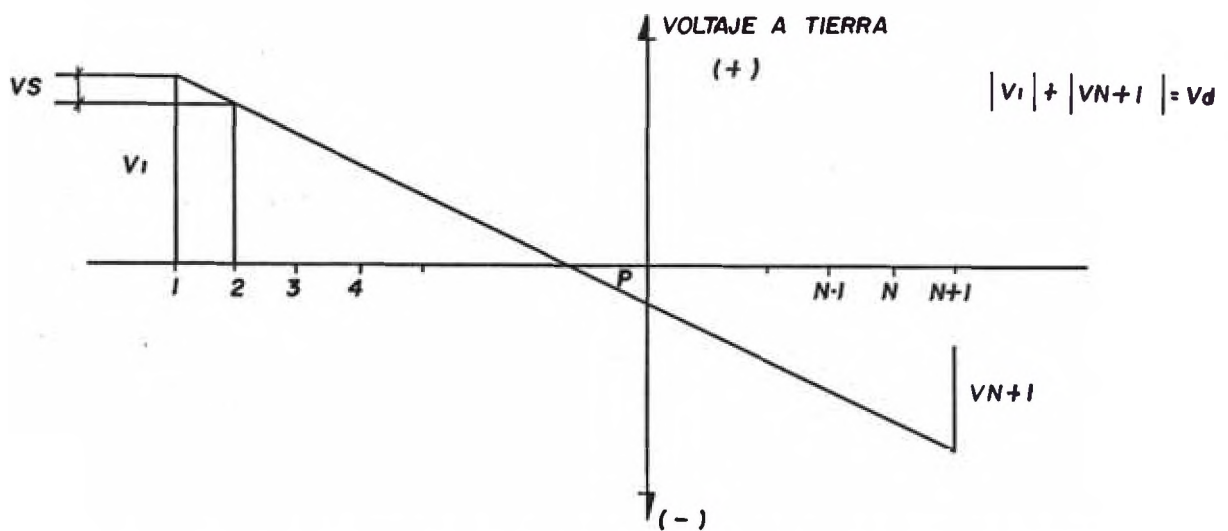


Fig. 14.2 Sistema con falla a tierra en el sector positivo

Fig. 14 Distribución de voltajes a tierra en el circuito electrolítico

3.2. Rectificador CPR

3.2.1. Aspectos generales

Como se ha adelantado en el capítulo I, "Módulo Piloto CPR", el circuito metalúrgico plantea las siguientes exigencias:

- . Inversión periódica y automática de la corriente
- . Regulación automática del valor de corriente deseado
- . Temporización adecuada de los ciclos

Según puede apreciarse en la fig. 6, existe variación de la tensión de celdas con el tiempo y dirección de la corriente, lo que conlleva a que el equipo esté continuamente variando el voltaje DC (Control continuo de corriente). Esta características variable se reflejará posteriormente en los valores de potencia AC consumida. Teniendo en cuenta los grandes valores de corriente a conmutar, es necesario usar rectificadores de silicio controlado (SCR), con una configuración similar a la mostrada en la fig. 5.

3.2.2. Consideraciones importantes en la configuración CPR

Para determinar la configuración más adecuada, consideraremos los siguientes aspectos:

1. Distribución de voltajes a tierra
2. Influencia de la conmutación y potencia variable en el circuito eléctrico.
3. Consideraciones metalúrgicas y operacionales.

1. Distribución de voltajes a tierra

Como se vio en la sección 3.1.2. y fig. 14, los extre--mos del circuito electrolítico se encuentran sometidos al mayor voltaje a tierra, produciéndose una incidencia superior de fallas en el PVC de las celdas electrolíti-

cas que están ubicadas en los extremos. En el caso de la RCu, la experiencia demuestra que se produce un incremento en la ocurrencia de fallas en las celdas cuando se modifica la distribución de potenciales (Ver fig. 14.2), dependiendo del grado de envejecimiento del PVC. Un análisis de las condiciones de ruptura va más allá del objetivo de este trabajo, pero en forma práctica se observa que existe un incremento del 100% en la ocurrencia de fallas, cuando la tensión en un extremo se eleva a más de 150 voltios por un período de tiempo prolongado.

Para las dos condiciones mostradas en las fig. 15 y 16, encontramos los valores de tensión que se tabulan en la tabla 10.

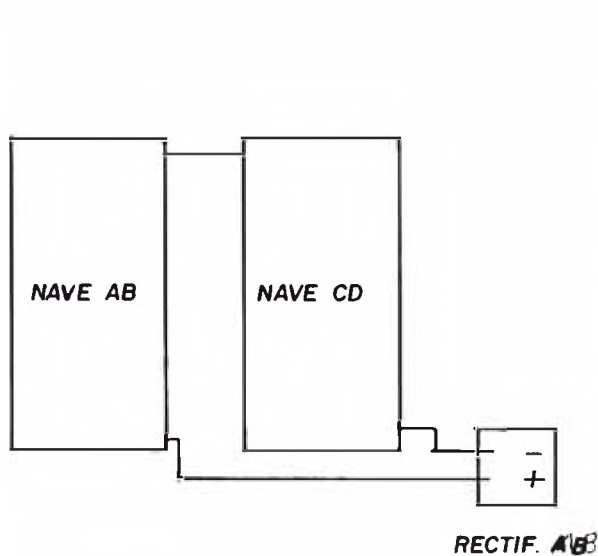


Fig. 15 Configuración con un sólo circuito comercial

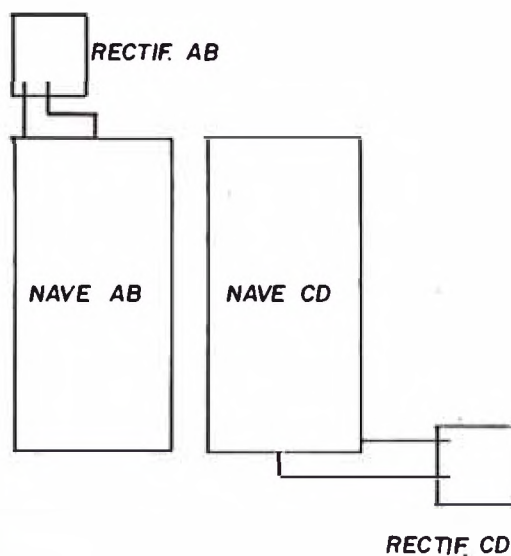


Fig. 16 Configuración con dos circuitos comerciales

Se ha asumido que el nivel de pérdidas en barras es similar al actual circuito de 21 KA (Igual densidad de corriente)

TABLA 10. VOLTAJES A TIERRA EN CIRCUITOS ELECTROLITICOS CPR
A 320 A/M² DE CORRIENTE EFICAZ

CONFIGURACION	N° CELDAS	TIEMPO	VOLTAJE A TIERRA MAXIMO (✱)
Un circuito	768	Directo	156.7 Volt. DC
		Inverso	113.1
Dos circuitos	384	Directo	78.4
		Inverso	56.6

(✱) Condiciones normales, contactos húmedos

Se puede apreciar que para la configuración CPR de un circuito, y bajo un nivel de operación actual en la RCu de 112 voltios a tierra, el 40% de las celdas tendrían un potencial a tierra sobre el actual, con lo que se espera un incremento apreciable en el índice de falla del PVC. El incremento de fugas de corriente sería:

(Suponiendo R de fuga=R1=R2=R3=Rn en ecuación 3.7)

$$\sum I_{f_{DC}} = \frac{\sum V}{R} = \frac{(V_{extremo}) \times n}{R} = \frac{112.5 \times n}{R}$$

$$\sum I_{f_{CPR}} = \frac{156.7 \times n}{R}$$

$$\Delta I_f = 40\%$$

Este valor sería el mínimo, suponiendo un comportamiento lineal de la resistencia del PVC con la tensión aplicada. Bajo condiciones de falla, la situación es más crítica.

2. Influencia de la conmutación y potencia variable en el sistema eléctrico

En la fig. 17 se muestra la curva de potencia AC, derivada de la fig. 6 y considerando 768 celdas CPR, busbar de cobre operando a 1 A/mm².

Los valores de potencia se muestran en la siguiente tabla, rectificadores hexafásicos con una eficiencia de conversión del 95%.

TABLA 11. VALORES DE POTENCIA CPR

CONFIGURACION	PERIODO	I_{DC} (KA)	V_{DC} (VOLT)	POT_{DC} (KW)	POT_{AC} (KW)
Un circuito	Directo	32.51	313.4	10,190	10,730
	Inverso	32.51	226.2	7,350	7,740
Dos circuitos	Directo	32.51	156.7	5,100	5,365
	Inverso	32.51	113.1	3,675	3,870

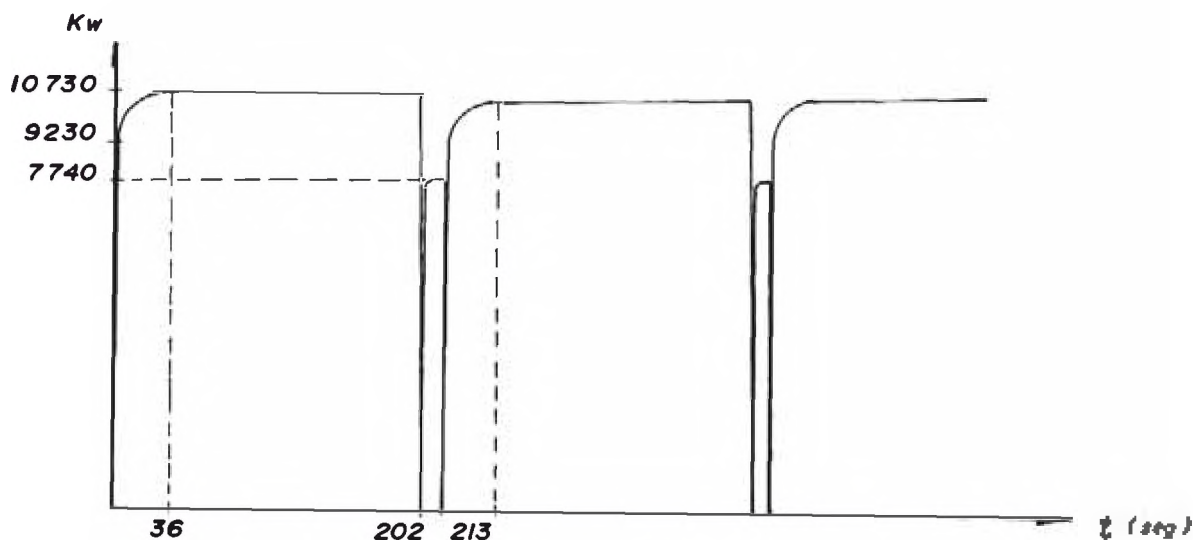


Fig. 17.1 Potencia AC para un solo circuito electrolítico CPR

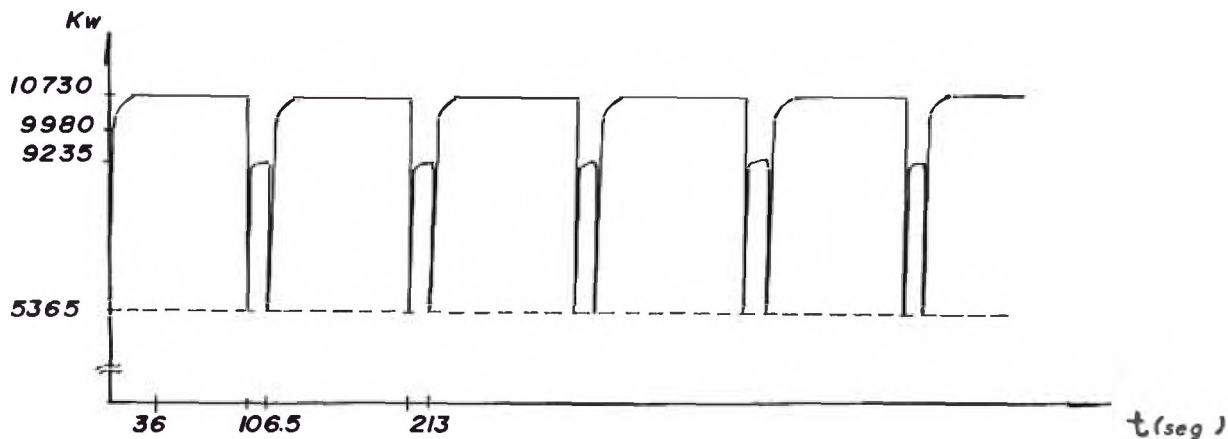


Fig. 17.2 Potencia AC para 02 circuitos electrolíticos superpuestos y "desfasados" $\frac{1}{2}$ ciclo (106.5 seg.)

Como puede apreciarse del examen de las curvas 17.1 y 17.2, la configuración CPR en dos circuitos independientes permite una carga más estable si es que los tiempos de conmutación no son coincidentes y alcanza su punto óptimo si la conmutación de los dos circuitos se realiza con un desfase de $\frac{1}{2}$ ciclo (106.5 seg). Como se verá más adelante, en la sección 3.2.2., desde el punto de vista de potencia reactiva, la configuración de dos circuitos es la más conveniente.

3. Consideraciones metalúrgicas y operacionales

Son las siguientes:

- Control de aditivos y eficiencia de proceso

La vigilancia de los aditivos agregados al electrolito y su consumo, Vs la energía DC y características del proceso, se vuelve más manejable conforme se tengan más circuitos independientes.

- La presencia de voltajes superiores a los 100 VDC crean problemas al personal que opera en la reparación de celdas y tanques de circulación e intercambio.
- Bajo situaciones de falla a tierra (Fogonazos y destrucción del PVC), en ocasiones es necesario apagar el rectificador. Se ocasionan menos pérdidas productivas conforme se tengan más circuitos independientes.
- Los cortes imprevistos de corriente DC crean dificultades operativas (Elevación de los lodos de las celdas). Conforme se tengan más circuitos independientes, una salida de operación de rectificadores afectará menos a la producción.

CONFIGURACION CPR PARA LA RCu ILO

Como conclusión de la discusión anterior, la configura-

ción más adecuada para la RCu Ilo es la de dos circuitos electrolíticos independientes, como se muestra en la fig. 16, requiriéndose, en consecuencia, dos rectificadores CPR de 33,000 amperios DC (Hasta una densidad de 325 A/m² efectivos).

3.2.3. Rectificador CPR

a. Voltaje DC de salida

La resistencia del electrolito depende de varios factores, entre los cuales se encuentra el nivel de aditivos y la temperatura.

Si consideramos que el proceso electrolítico no es enteramente estático y existiendo la posibilidad de variar la densidad de corriente y otros parámetros, es muy conveniente sobredimensionar el voltaje DC de salida.

Para el rectificador comercial actual de 21 KA, de ecuación (3.1) y de tabla 8:

$$V_{DC \text{ máx}} = \frac{3}{PI} (1.41 \times 290.3 - 21,000 \times 6.27 \times 10^{-4})$$

$$V_{DC \text{ máx}} = 378.31 \text{ voltios DC}$$

A 21,000 ADC, el voltaje total será bajo las condiciones actuales:

$$V_{DC} = \frac{225 \times 21,000}{19,700} = 240 \text{ VDC}$$

El sobredimensionamiento VDC del transformador es:

$$\frac{378.31}{240.00} \times 100 = 157.6\%$$

Sin embargo, si nos limitamos a la máxima salida del rectificador, el sobredimensionamiento es:

$$\frac{330.0}{240.0} \times 100 = 137\%$$

Valor que tomaremos como el de diseño para el sistema -
CPR

NOTA: Bajo las condiciones normales, en sólo una oca
sión se obtuvo un voltaje de 270 voltios a 19,600
amperios, por problemas en el proceso.

b. Características y configuración del rectificador CPR

b.1. Configuración

La configuración elegida para el rectificador CPR,
se muestra en la fig. 18.

Las figuras 10 y 11 muestran las formas de onda
correspondientes a este dispositivo.

Las ecuaciones correspondientes son:

$$V_d = \frac{3 \sqrt{3}}{2 \pi} V_s \cos \alpha - I_d \frac{3 X_c}{4 \pi} \quad (3.11)$$

$$V_{ao} = 1.05 P_{do} \quad (3.12)$$

$$\cos \phi = \cos \alpha = r \quad (3.13)$$

$$\lambda = 0.955 r \quad (3.14)$$

Operando las fórmulas, obtenemos las característi-
cas generales mostradas en la tabla siguiente (12)

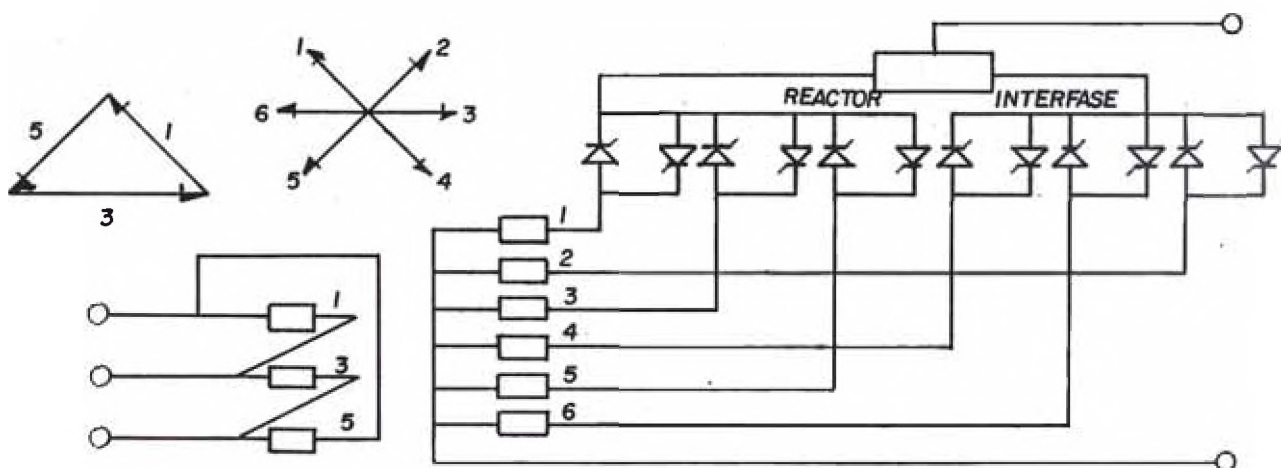


Fig. 18 Rectificador CPR de 6 pulsos con reactor de interfase

TABLA 12. CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR CPR

Servicio	Bajo techo
Tipo de enfriamiento	OFAF
Voltaje nominal	10,000 V
Frecuencia	60 Hz

	LADO AC	LADO DC
Número de fases	3	Según diseño
Capacidad nominal	7,450 KVA	7,450/N° de fases
Voltaje nominal	10,000 V	183.5 V
Corriente nominal	430.6 A	Según N° de fases

CONEXION AC	CAMBIADOR DE TAP	VOLTAJE DC
(Según proveedor, mínimo 10 posiciones de tap cubriendo del 35 al 100% del voltaje nominal del secundario)		

CARACTERISTICAS DEL RECTIFICADOR

Servicio	Bajo techo
Tipo de enfriamiento	WFWF
Capacidad nominal	7,095 KW
Voltaje DC	215 VDC
Corriente DC	33,000 A

b.2. Sistemas de enfriamiento

Condiciones ambientales: Brisa marina, presencia - de SO₂ en el ambiente y emisión de vapores ácidos producidos por el proceso electrolítico.

- . Transformador. Enfriamiento por aceite forzado , a su vez enfriado por aire forzado (OFAF).
- . Rectificadores. Enfriamiento por circulación forzada de agua desionizada, enfriada a su vez por agua cruda y torre de enfriamiento.

b.3. Características del control electrónico

- . Control automático de corriente, dentro de + 1% del valor de ajuste (Setpoint).
- . Inversión automática de la polaridad según tiempos prefijados.
- . Tiempo directo: 0-300 segundos
- . Tiempo inverso: 0-50 segundos
- . Circuito de sincronización, acepta señal externa para iniciación de ciclos. Emite señal para coordinación con otro sistema similar.
- . Indicación digital del valor de corriente y acumulador A-h de capacidad mensual.

b.4. Sistemas de protección e indicación de fallas

TABLA 13. SISTEMAS DE PROTECCION

FALLA	DISPOSITIVO	DISPARO	ALARMA
Sobrecorriente DC del rectificador	76	X	X
Bajo voltaje AC	47	X	X
Falla de tiristor	71F1	-	X
Falla de fusible	71F2	-	X
Sobretemperatura de agua desionizada	26W	X	X
Sobrecorriente en motor de bomba de agua	49W	X	X
Bajo flujo de agua desionizada	69W	X	X
Sobrecorriente de motor ventilador de enfriamiento	49F	-	X
Bajo flujo de agua	33W	-	X

* Incluye sistemas de protección del transformador, bajo y sobrevoltaje, sobrecorriente, altovoltaje a tierra, Buchholtz, etc.

3.3. Potencia activa y reactiva (Bajo condiciones $I_{ef}=320$ A/m²)

3.3.1. Potencia activa

De acuerdo con el gráfico 17, donde se combina la potencia consumida por ambos rectificadores, obtenemos la siguiente tabla, en la que se resumen las principales características.

TABLA 14. CARACTERISTICAS DE POTENCIA ACTIVA CPR

Potencia máxima (Directo)	10,730 KW
Potencia mínima (Directo)	5,365 KW
Potencia inversa	9,235 KW
Tiempo máximo de conmutación	0.5seg
Tiempo período positivo	101 seg
Tiempo período inverso	10 seg



Fig. 19 Potencia activa CPR. Rectificadores operando con un desfase de $\frac{1}{2}$ ciclo (106.5 seg) $I_{ef} = 320 \text{ A/m}^2$

3.3.2. Potencia reactiva

La potencia reactiva, de acuerdo con las fórmulas 3.12 y 3.14, está dada por:

$$Q = 1.05 \left(\frac{1 - \mathcal{K}}{\mathcal{K}} \right)^{\frac{1}{2}} E_{DC} I_{DC} \quad (3.15)$$

Operando la fórmula 3.11 para un voltaje DC directo de 156.7; impedancia $X_c = 7\%$, de datos de tabla 12 y un factor de regulación del 10%, se obtiene para cada equipo CPR $V_s = 149.7 \text{ VAC}$

Finalmente, de fórmulas (3.11), (3.12), (3.13), (3.14) y (3.15), obtenemos la siguiente tabla.

(Continúa tabla 15)

TABLA 15. POTENCIA REACTIVA POR RECTIFICADOR CPR

PARA I = 32,510 AMPERIOS

TIEMPO DE CONDUCCION	POTENCIA AC (KW)	E_{DC}		Q (KVAR)
Directo	Máx 5,365	156.7	0.87	3,041
	Mín 4,613	141.9	0.83	3,100
Inverso	3,870	119.0	0.70	3,950

Y, operando ambos rectificadores CPR bajo los mismos valores de tensión y corriente, pero desfasados $\frac{1}{2}$ ciclo, obtenemos la siguiente tabla:

TABLA 16. POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA PARA 2 CIRCUITOS CPR

DESFASADOS $\frac{1}{2}$ CICLO

TIEMPO DE CONDUCCION	POTENCIA ACT. (KW)	POTENCIA REACT. (KVAR)	FACTOR DE POTENCIA
Directo	10,730	6,082	0.87
	9,978	6,141	0.85
Inverso	9,235	6,991	0.795

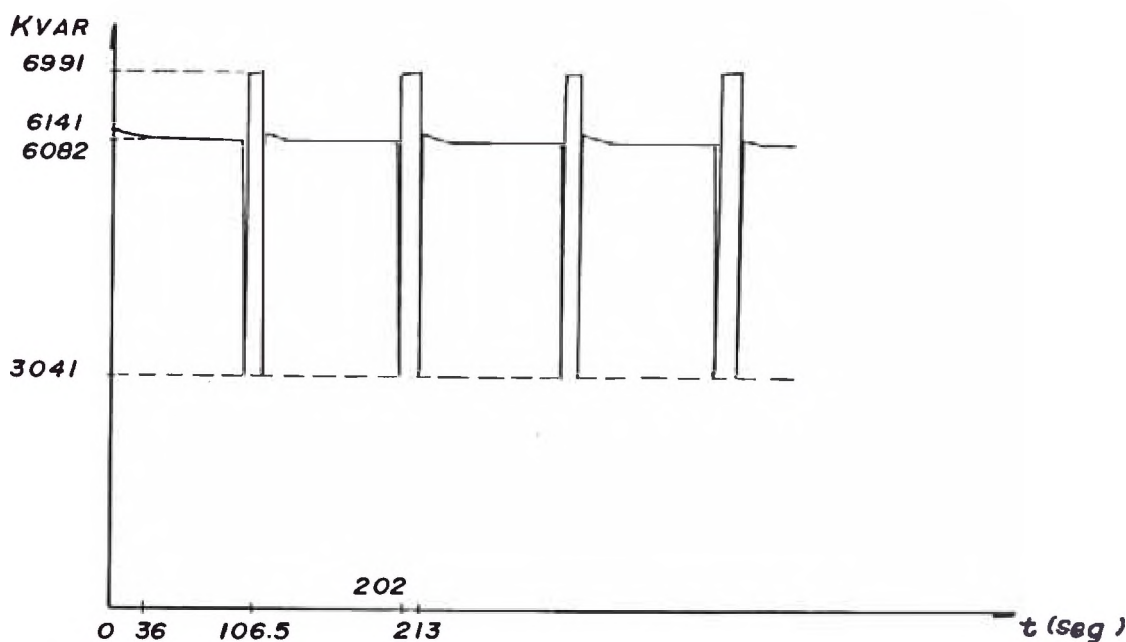


Fig. 20 Potencia reactiva CPR. Dos rectificadores desfasados $\frac{1}{2}$ ciclo

$$I_{DC} = 32,510 \text{ A} \quad V_s = 150 \text{ VAC}$$

3.4. Conclusiones

1. Se ha visto la conveniencia de contar con dos circuitos CPR in dependientes en el presente proyecto. Esta circunstancia lleva aparejada la posibilidad de un enlace entre ambos dispositivos para concertar un conveniente desfase en sus períodos de con ducción; la que, sin embargo, no es crítica debido a la característica aplanada de la curva de potencia hasta un valor de 36 segundos desde el inicio del ciclo.
2. Igualmente, se ha determinado la característica de energía re activa para la operación de dos rectificadores, la cual permitirá, en un próximo capítulo, establecer el equipamiento ade cuado para su compensación.
3. Un aspecto importante en cuanto a las especificaciones del rec tificador, es la tensión variable en el secundario del trans-- formador. Como se ha visto, a fin de consumir el mínimo de e nergía reactiva, el voltaje de alimentación al rectificador de be estar ajustado a los requerimientos mínimos de regulación - de corriente.

Es usual, por razones operativas, que durante el período ini cial de operaciones, no se alcance el nivel calculado de co rriente en el proceso (320 A/m² en nuestro caso). Este aspecto se incluirá en la discusión sobre energía reactiva a compensar en el capítulo V.

CAPITULO IV

DISTRIBUCION EN CORRIENTE CONTINUA

Sistema actual. Rediseño de barras. Rediseño de recorrido. Sistema de puenteo.

4.1. Sistema actual

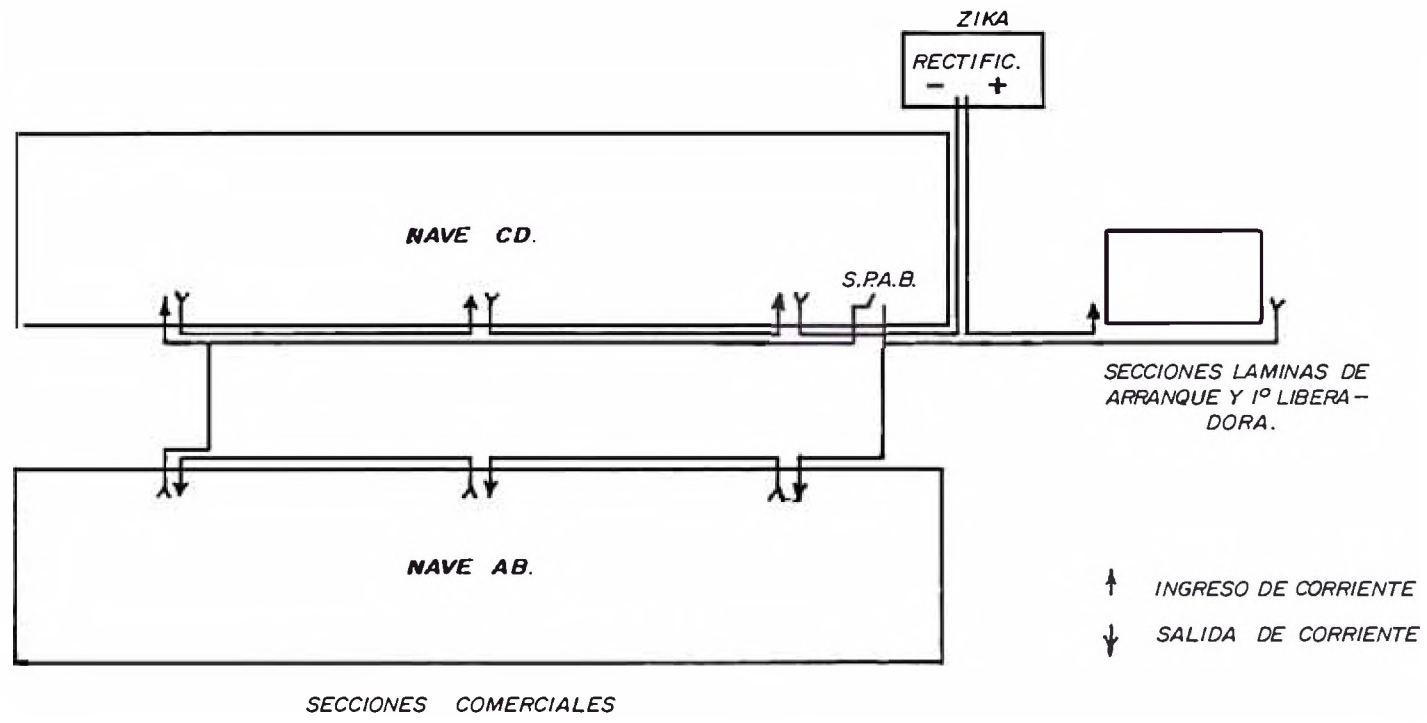
La fig. 21 muestra el recorrido de barras (Busbar) actual en el sector comercial. Como se vió en el capítulo anterior, el recorrido comercial será modificado por la presencia de dos equipos rectificadores, que alimentarán exclusivamente las celdas comerciales.

El rectificador actual de 21 KA, también alimenta a las secciones de láminas de arranque y primera liberadora. Debido al corto tiempo de proceso (24 horas) para la producción de láminas de arranque y al especial funcionamiento de las celdas de primera liberadora, no es factible la aplicación de corriente CPR en las mencionadas celdas; en consecuencia, éstas se independizarán del circuito comercial y serán alimentadas exclusivamente por el rectificador de 21 KA.

Las modificaciones en estos circuitos y la independización de los sectores comerciales de naves AB y CD, se tratarán a continuación.

Para realizar la extracción de los cátodos a término de proceso o "cosecha", se deriva la corriente de dos grupos de celdas (Secciones) mediante interruptores accionados por aire. Estos dispositivos de puenteo se observan en la fig. 23. Como se puede entender del examen de la figura, operan con carga tanto en la maniobra de cerrado como en la apertura y soportan la corriente instantánea en el puenteo. Su operación requiere cuidados especiales, así como un mantenimiento continuo y caro. Las implicancias del uso de la CPR en el diseño de estos dispositivos, son materia de

Fig. 21 Disposición original de Busbar 21 KA



una discusión posterior.

4.1.1. Pérdidas en el circuito busbar

La sección del busbar de cobre es:

$$S = 14 \times 10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} = 21,000 \text{ mm}^2$$

Contándose con 14 barras en el paquete de busbar o en el de acometida.

Para las pérdidas resistivas:

$$P(\text{Busbar}) = \rho \frac{L}{S} \times I^2 \quad (I = 19,700 \text{ A})$$

Donde $\rho = 0.017521 (1 - 0.00385/^{\circ}\text{C} \times 20)$

$$\rho = 0.01887 \text{ a } 40^{\circ}\text{C} \frac{\text{ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Luego:

$$P(\text{Busbar}) = 345.24 \text{ watt/metro}$$

Para una longitud de pérdidas estimada de 450 metros

$$P(\text{Busbar}) = 155 \text{ KW}$$

$$\Delta V(\text{Busbar}) = 7.96 \text{ voltios}$$

4.1.2. Pérdidas por caída de tensión en contactos

La caída de tensión promedio entre el contacto busbar y el crossbar es de:

$$\Delta V_C = 11.3 \text{ mV para todo el sector comercial}$$

$$\Delta V_{CT} = 11.3 \times 10^{-3} \times 769 \text{ voltios}$$

$$\Delta V_{CT} = 8.7 \text{ voltios}$$

Para una corriente de 19,700 amperios, la pérdida de potencia es:

$$P (\text{Contactos}) = 8.7 \times 19,700 = 171.4 \text{ KW}$$

4.1.3. Cálculo térmico del busbar convencional

Cálculo del busbar

Fórmulas utilizadas para determinar el calor evacuado:

a. Por conducción:

$$h_c = \frac{A K_m \Delta t}{l} \quad (4.1)$$

Para el cobre: $K_m = 2,665$ (Unidades británicas)

$h_c =$ watt

$A =$ área

$\Delta t =$ gradiente de t°

$l =$ longitud de conducción

$K_m =$ conductividad térmica

b. Por convección: (Placas verticales y horizontales)

$$h_b = 11.70 \times \Delta t \times 1.25 \times 10^{-4} \times C (\text{° Celsius}) \quad (4.2)$$

Donde:

$$h_b = \text{watt/pulg}^2$$

$\Delta t =$ gradiente de temperatura

$C =$ constante (Ver tabla)

Altura (Pulg.)	C
8	1.35
6	1.53
4	1.76
2	2.70

c. Por radiación:

$$h_r = \epsilon \times 3.68 (t_o^4 - t_a^4) \times 10^{-11} (\text{° Celsius}) \quad (4.3)$$

$\epsilon =$ coeficiente de absorción

$t_o =$ temperatura absoluta de superficie emisora

$t_a =$ temperatura absoluta de superficie absorbente

Para el cobre (Oxidado) = 0.72

d. Otros:

$$\rho_{Cu} = 0.017521 \frac{\text{ohm} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \text{ Resistividad Cu a } 20^\circ\text{C}$$

$$\alpha_1 = 0.00385/^\circ\text{C} \quad \text{Coeficiente de } t^\circ \text{ a } 20^\circ\text{C} \\ \text{(Cobre IACS 98.4)}$$

$$\rho_{Cu}(t_2) = \rho_{Cu} (1 + \alpha_1 (t_2 - t_1)) \quad (4.4)$$

Cálculo para barras actuales

a. Consideraciones

. Promedio de gradientes de t° (Experimental) = 20°C a $19,600\text{A}$

. Calor evacuado por radiación de las caras verticales de barras interiores despreciable. Sólo se consideran las dos caras exteriores y cantos superior e inferior.

. Dimensiones de barras: 10 mm x 150 mm

n = N° de barras: 14

At = Area transversal = 21,000 mm²

Al = Area lateral/metro = 39.37 x 5.905 = 232.48 pulg²

l = 0.1968 pulg.

$$\rho = 0.017521 \text{ ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m} \text{ (a } 20^\circ\text{C)}$$

$$\alpha_1 = 0.00385/^\circ\text{C} \text{ Cobre } 98.4 \text{ IACS}$$

b. Cálculos

b.1. Por conducción

La potencia a disipar por barra será:

$$P = \frac{I^2 R}{n} = \frac{I^2}{n} \rho \frac{L}{At} = 24.66 \text{ watt/metro}$$

Para un lado de la barra.

El área de conducción es Al = 232.48 pulg²

$$hc = 24.66/2 = 12.33 \text{ watt}; hc = \frac{12.33 \text{ watt}}{2.9307 \times 10^{-1} \frac{\text{watt}}{\text{BTU/hr}}}$$

$$hc = 42.07 \text{ BTU/hr}$$

En ecuación (4.1)

$$t = \frac{hc \times 1}{A Km} = \frac{42.07 \times 0.1968}{232.48 \times 2,661}$$

$$t = 1.34 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Despreciable})$$

b.2. Por convección

El área de disipación es:

$$A = 232.48 - 2 \times 0.1968 \times 39.37 = 247.98 \text{ pulg.}^2$$

En ecuación 2:

$$t = \frac{24.66 / (247.92 \times 2)}{11.7 \times 1.25 \times 10^{-4} \times 1.53} = 22.22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b.3. Por radiación:

$$hr = \epsilon \times 3.68 (t_o^4 - t_a^4) \times 10^{-11}$$

$$\text{Si } \Delta t = 22 \text{ } ^\circ\text{C} \quad hr = 0.72 \times 3.68 (319^4 - 298^4) \times 10^{-11}$$

$$t_a = 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad hr = 0.069 \text{ w/pulg.}^2$$

El calor radiado por el paquete de barras por me
tro será:

$$qr = 0.069 \times (2 \times 232.48 + 2 \times 14 \times 0.3937 \times 39.37)$$

$$qr = 0.069 \times 898.96 = 62.03 \text{ watt}$$

Para la iteración con el cálculo de disipación:

$$1^\circ \text{ cálculo} = 22.22 \text{ } ^\circ\text{C} = 62.03 \text{ watt}$$

$$2^\circ \text{ cálculo} = 18.23 \text{ } ^\circ\text{C} = 50.36 \text{ watt}$$

$$3^\circ \text{ cálculo} = 18.98 \text{ } ^\circ\text{C} = 52.63 \text{ watt}$$

$$4^\circ \text{ cálculo} = 18.84 \text{ } ^\circ\text{C} = 52.19 \text{ watt}$$

$$5^\circ \text{ cálculo} = 18.86$$

$$\text{Luego, } \Delta = 18.86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Las fórmulas prácticas utilizadas en el presente -
cálculo, así como la asunción a un valor promedio
de temperaturas en los busbar, dan un resultado muy

aproximado a la realidad. Estas fórmulas serán uti
lizadas para el cálculo de las barras a nuevos va
lores de corriente con CPR.

4.2. Rediseño de barras

4.2.1. Cálculo térmico

a. Consideraciones

. El recorrido de los busbar actuales limita el incre
mento de la altura de las barras, ya que transcurre
por debajo de estructuras, vigas, etc., requiriéndose
importante trabajo civil para realizar un incremento
sustantivo en la altura de las barras.

. Busbar de cobre 98.4 IACS
= 0.017521 ohm.mm²/m (A 20°C)
= 0.00385/°C

b. Cálculos

Pérdidas por metro de busbar

$$P = I^2 R = I^2 \frac{\rho}{A}$$

4.2.2. Elección de la configuración de barras

Realizaremos la elección considerando lo siguiente:

- . Aspecto económico.
- . Incremento de la temperatura

1. Costo de la energía eléctrica

Para un costo actual de US\$ 0.04/kWh, obtenemos la si
guiente tabla, a partir de las pérdidas estimadas en la
tabla 17.

TABLA 17. PERDIDAS EN BARRAS CPR A 33,000 A

N° de barras incrementadas	Sección increment. (mm ²)	Incremento de temperatura (°C)	Potencia disipada (KW)	Diferencia (KW)
1	1,500	49.8	418	30
2	3,000	43.8	388	26
3	4,500	38.7	362	26
4	6,000	34.2	336	22
5	7,500	30.5	314	19
6	9,000	Menor de 30°	295	17
7	10,500	"	278	15
8	12,000	"	263	-

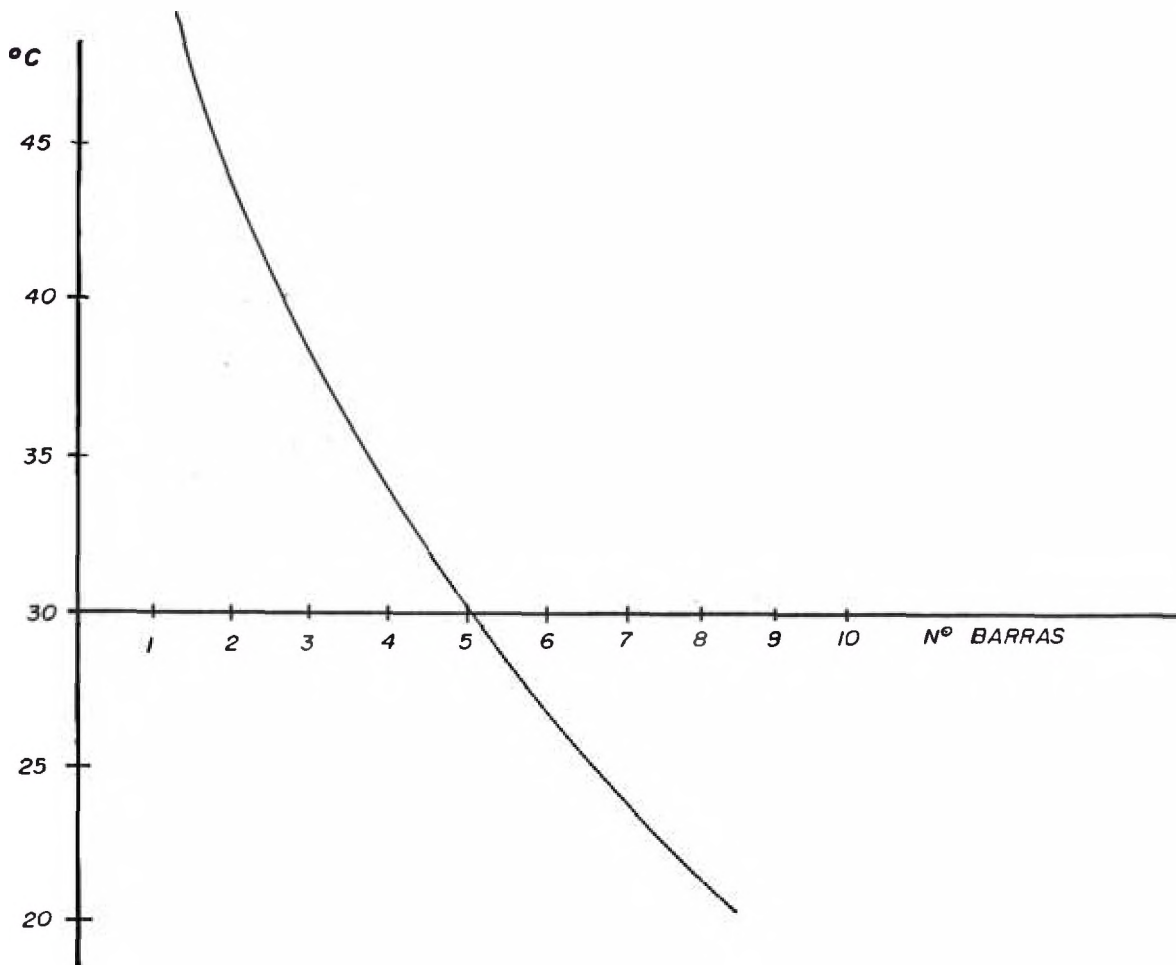


Fig. 22 Incremento de temperatura Vs. N° de barras

TABLA 18. PERDIDAS DE ENERGIA ELECTRICA EN US\$

<u>PARA DIFERENTES INCREMENTOS</u>			
N° de barras incrementadas	Potencia disipada (KW)	Costo de energía mensual (US\$)	Costo energía 15 años. Valor actual (US\$)
1	418	12,038	1'259,656
2	388	11,174	1'169,247
3	362	10,426	1'090,977
4	336	9,677	1'012,602
5	314	9,043	946,259
6	295	8,496	889,021
7	278	8,006	837,784
8	263	7,574	792,543

Se ha asumido una vida útil del proyecto, de 15 años, y una tasa de interés del 8% anual.

2. Costo de la instalación de barras de cobre

a. Hasta 4 barras de cobre

- . Horas hombre US\$ 100.00/mt
- . Cobre US\$ 145.00/mt

Por paquete

- . Adecuación de pernos inoxidables US\$ 40/mt x paquete

b. Más de 4 barras de cobre

Por metro de barra

- . Horas hombre US\$ 130.00/mt
- . Cobre US\$ 145.00/mt

Por paquete

- . Pernos inoxidables US\$ 130.00/mt paquete
- . Anclajes US\$ 200.00/mt paquete
- . Otros (Civiles) US\$ 50.00/mt paquete

TABLA 19. COSTO DE INSTALACION DE BARRAS

Nº DE BARRAS INCREMENTADAS	COSTO INSTALACION (US\$/MT.)	COSTO TOTAL (700 MT.) (US\$)	RECUPERACION AL VALOR PRESENTE (US\$)	VALOR NETO (US\$)
1	285	199,500	4,154	195,346
2	530	371,000	8,308	362,692
3	775	542,500	12,445	530,055
4	1,020	714,000	16,615	697,385
5	1,755	1'228,500	20,769	1'207,731
6	2,030	1'421,000	24,923	1'396,077
7	2,305	1'613,500	29,076	1'584,424
8	2,580	1'806,000	33,230	1'772,770

Tasa de interés, 8% anual. Vida del proyecto, 15 años

De la observación de las tablas 17, 18 y 19, inferimos que la configuración más conveniente es la de 4 barras adicionales al actual paquete, con lo cual, la densidad de corriente circulante será: 1.2 A/mm², y con una gradiente de temperatura de 34°C sobre la temperatura ambiente.

El plano 4 muestra la nueva disposición.

4.3. Rediseño del recorrido

✓ En el plano 5 se esquematiza el nuevo recorrido para los busbar CPR. La disposición es la siguiente:

- Secciones láminas de arranque y
 - 1ra. liberadora... Rectificador de 21 KA
- Secciones comerciales nave AB... Rectificador CPR-AB
- Secciones comerciales nave CD... Rectificador CPR-CD

.. Calcularemos el incremento de temperatura en las barras para un incremento de una en una barra de 10 x 150 mm de sección.

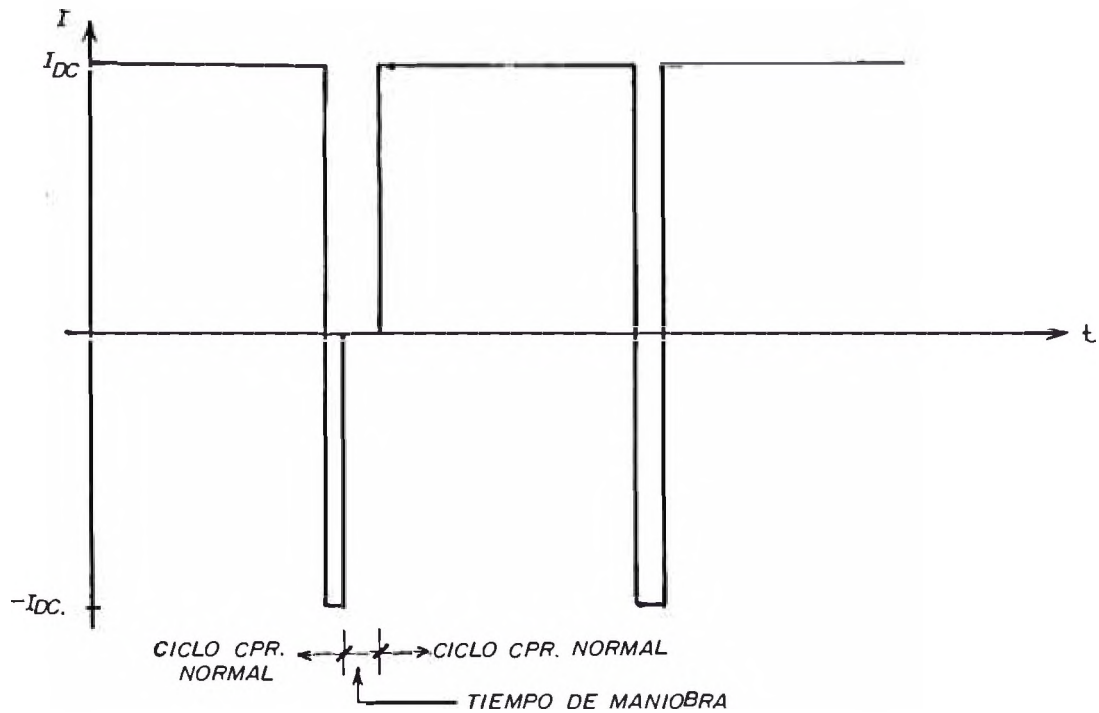


Fig. 24 Esquema de maniobra del seccionador puente
el ciclo CPR

El esquema lógico del proceso a seguir, se ve en la fig. 25.

Normalmente, la pérdida de producción por maniobra de seccionadores, se reducirá al tiempo en que demore la conmutación (Se esperan 6 conmutaciones por día como máximo). Siendo los seccionadores de accionamiento neumático, la pérdida no es representativa.

4.5. Conclusiones

1. La adecuación del actual sistema de conductores DC para CPR 33,000 A, es relativamente sencilla, bastando añadir barras a

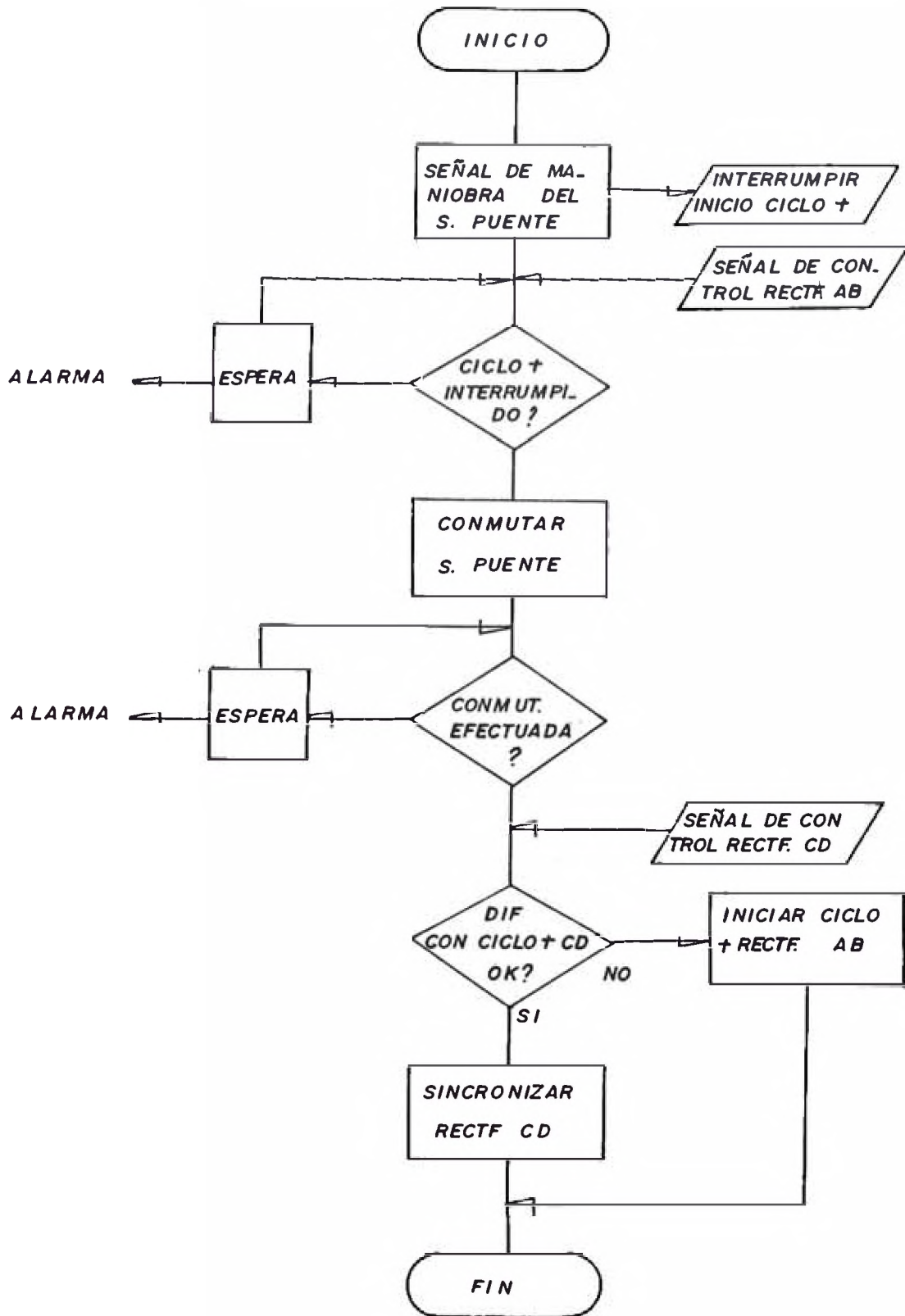


Fig. 25 Diagrama de flujo del proceso de maniobras del seccionador puente CPR nave AB

los actuales paquetes. El actual recorrido requiere pocas modificaciones.

2. Los mecanismos de puenteo son fácilmente sustituibles, aprovechando la característica CPR, por otros de mayor capacidad y de bajo costo, los cuales permitirán una operación más segura y a menor costo de mantenimiento que los actuales.
3. La modalidad de puenteo planteada, refuerza el requerimiento - presentado en el anterior capítulo, de la posibilidad de sincronización de los dos rectificadores a fin de no "perder el paso" y originar problemas en la potencia total consumida.
4. Es conveniente contar con un diseño centralizado o panel de conmutación, para el accionamiento de los seccionadores puente, ya que éste será automático. El accionamiento manual de los mismos, requerirá retirar la alimentación del rectificador.

CAPITULO V

MEDIA TENSION CON CPR

Distribución en 10 KV. Interruptores y cable de distribución. Compensación capacitiva. Distribución en 3.8 KV. Sistema de protección

5.1. Distribución en 10 KV

5.1.1. Alimentación a rectificadores CPR

La alimentación a los dos rectificadores CPR se realizará a través de dos salidas en 10 KV, según se muestra en los planos 6 y 7. El equipamiento se detalla a continuación:

TABLA 20. EQUIPAMIENTO 10 KV CPR

DISPOSITIVO	CANTIDAD	DESCRIPCION
52 MCPR	4 Pz.	Interruptor en volumen reducido de aceite, 12 KV, 600 A, 60 Hz, 18.4 KA , trifásico
CT1	4 Jg.	Transformador de corriente 600/5 A, 60 Hz, 10 KV, 40 VA
CT2	2 Jg.	Transformador de corriente 100/5 A, 60 Hz, 10 KV, 40 VA
	2 Eq.	Cubículo para interruptor 12 KV (Cada uno admite 2 interruptores del tipo <u>extraíble</u>)

Cable de distribución

Para una corriente nominal de 430.6 A, 10 KV, conductor - simple, aislamiento dieléctrico sólido (Polietileno), considerando los factores de corrección por agrupamiento (0.9) y temperatura ambiente 30° (0.92), la corriente de diseño será:

$$I = \frac{430.6}{0.9 \times 0.92} = 520 \text{ A}$$

Se elige el cable 1 x 400 mm² Cu, 10 Kv. Su disposición se muestra en la fig. 26

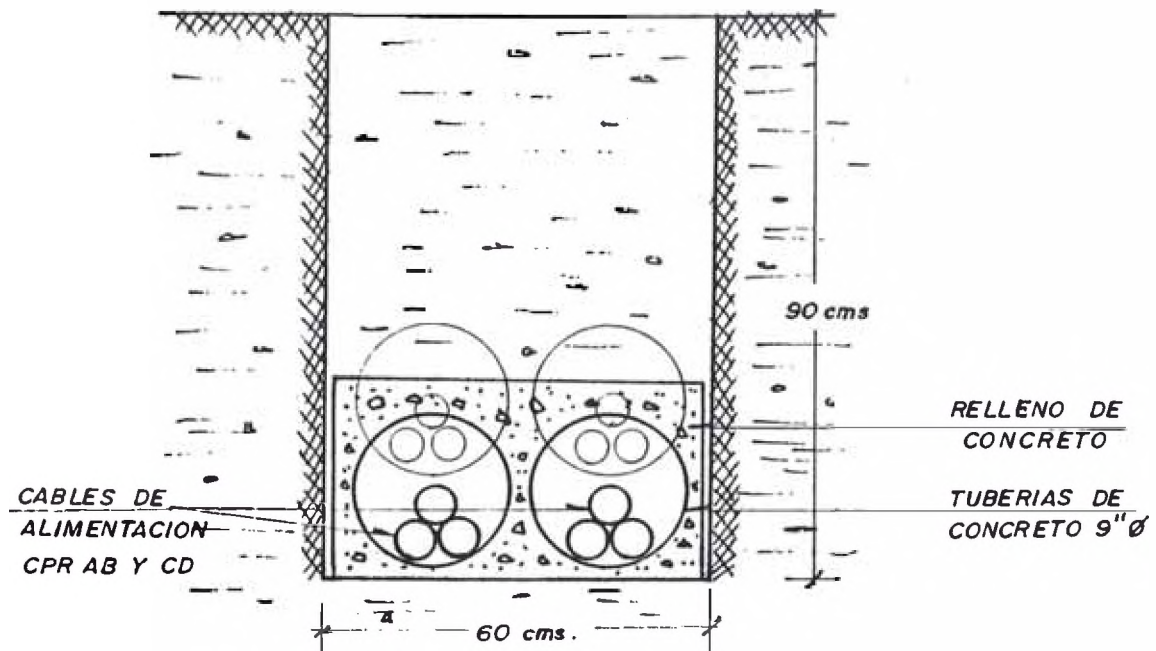


Fig. 26 Disposición de cables AT alimentación a rectificadores CPR

5.1.2. Compensación capacitiva

El consumo de energía reactiva de toda la planta está desglosado en:

a. Reactiva de rectificadores

- . Rectificadores CPR, discutido en el capítulo III.
- . Rectificadores 21 KA.

Operando con las secciones de láminas de arranque y 1ra. liberadora y asumiendo que operan a 20 KA, 32 VDC de tabla 7, operando las fórmulas 3.1 a 3.5 y de datos de tabla

$$Q = 563.3 \text{ KVAR}$$

b. Reactiva de motores y equipo eléctrico en general

El valor de la reactiva para la planta CPR será:

1,670... Valor promedio

2,100 KVAR... Horas de punta

Utilizando los datos de tabla 16, obtenemos las tablas 21 y 22.

La compensación base será:

$$Q_{CB} = 8,379 - 6,550 = 1,829 \text{ KVAR}$$

$$Q_{CB} = \text{Potencia reactiva mínima (Carga base)} - \text{Potencia reactiva condensadores 6 MVAR}$$

TABLA 21. VALORES DE POTENCIA EN LA PLANTA CPR
HORAS DE PUNTA (I_{ef} = 320 A/M²)

TIEMPO	POTENCIA ACTIVA (KW)	POTENCIA REACTIVA (KVAR)	F.P.
Directo	14,835	8,895.3	0.86
	14,083	8,954.3	0.84
Inverso	13,400	9,804.3	0.81

TABLA 22. VALORES DE POTENCIA EN LA PLANTA CPR
CARGA BASE (I_{ef} = 320 A/M²)

TIEMPO	POTENCIA ACTIVA (KW)	POTENCIA REACTIVA (KVAR)	F.P.
Directo	14,105	8,379	0.86
	13,353	8,438	0.84
Inverso	12,610	9,288	0.81

Para la compensación variable, tendríamos:

$$Q_{CV} = 9,804 - (6,550 + 1,782) = 1,472 \text{ KVAR}$$

Justificación de la compensación capacitiva

La inversión en compensación capacitiva por razones operacionales y costo de energía, se justifica en:

1. Permite el mejor uso del equipamiento del equipo de alta y media tensión.
2. El ahorro por pago de energía reactiva permite recuperar

rar la inversión a corto plazo.

3. Los armónicos introducidos por los rectificadores deben ser suprimidos para evitar efectos negativos en el funcionamiento de los equipos eléctricos.

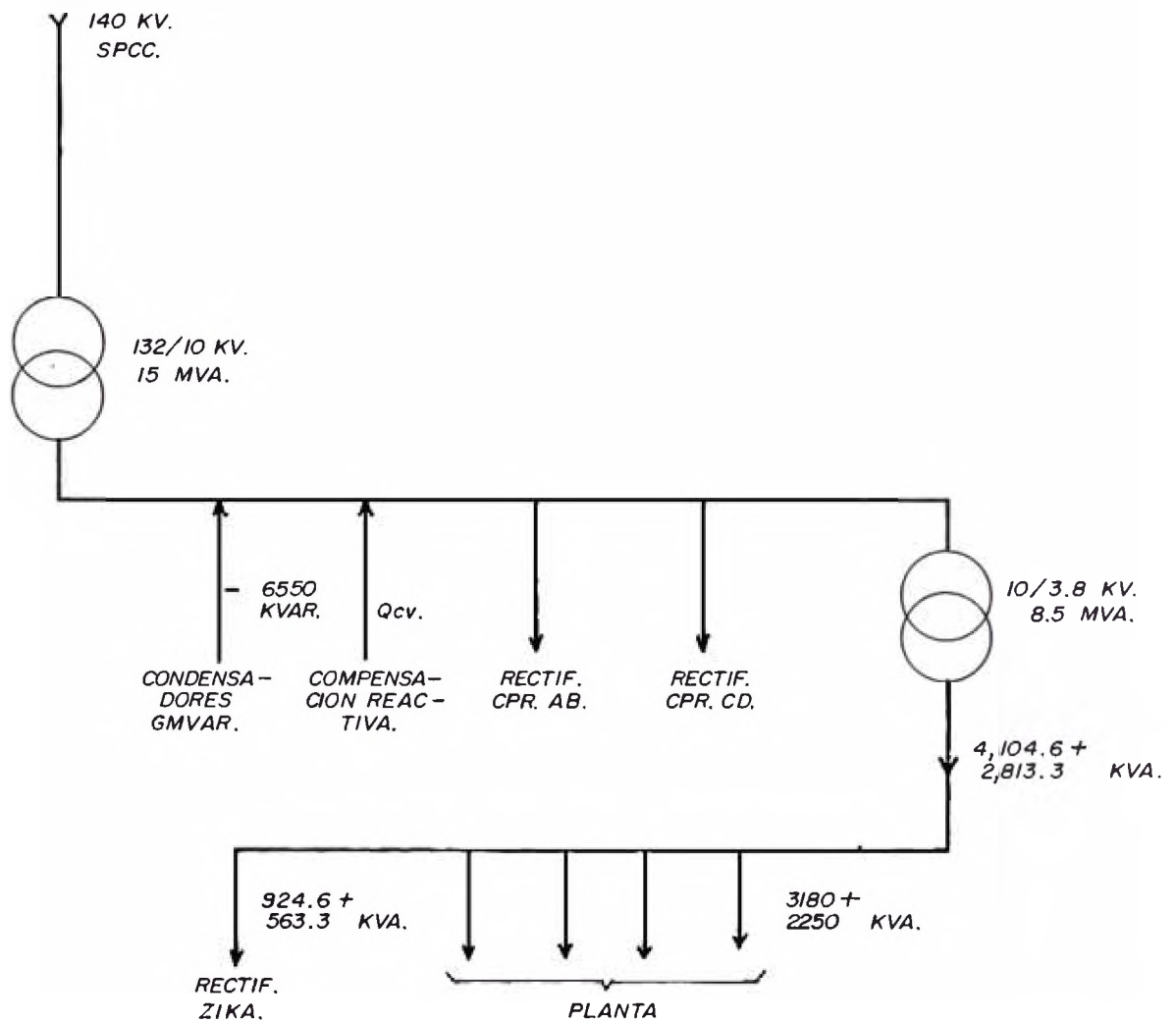


Fig. 27 Flujo de potencia con CPR/Horas de punta

5.1.2.1. Compensación capacitiva en 10 KV

Elegimos la compensación en la barra de 10 KV para la "compensación base" de 2 MVAR. El plano muestra la disposición del nuevo banco de condensadores, el cual se instalará en la actual salida de 10 KV para los rectificadores de 21 KA.

Descripción del banco de condensadores

Valores nominales: 2,000 KVAR, 10.5 KV, 60 Hz, 3 fases

- . Reactancia serie 6% de la capacidad nominal (120 KVAR), enfriamiento ONAN, bobinas sumergidas en aceite.
- . Reactores de descarga con bobina secundaria para protección por falla del condensador unitario o grupo.
- . Conexión estrella.

Cable de alimentación

Para los factores de agrupamiento (0.75) y temperatura (0.92), se elige el conductor simple de aislamiento sólido (Polietileno), 1 x 50 mm² Cu, 10 KV.

5.1.2.2. Compensación capacitiva en baja tensión

Elegimos la compensación en baja tensión para la compensación variable de energía reactiva.

La potencia a compensar en baja tensión será:

$$Q_{CV} = \text{Potencia reactiva máxima} - \\ \text{Potencia condensadores 6 MVAR} - \\ \text{Compensación base}$$

$$Q_{CV} = 9,804.3 - 6,550 - 2,000 = 1,254.3 \text{ KVAR}$$

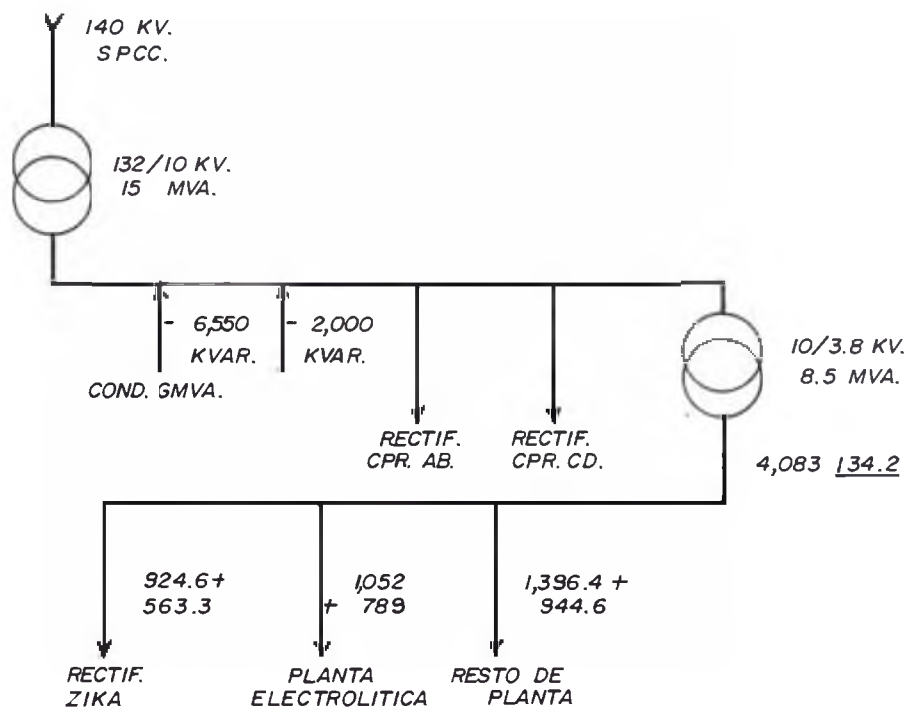


Fig. 28 Flujo de potencia carga base

La compensación se efectuará en las barras de 440 voltios de planta electrolítica. Para los valores máximos de consumo de energía CPR (Horas de punta), en planta electrolítica (Sin incluir rectificadores), es de:

$$N_{PE} = 1,360 + j 1,024.8 = 1,702.9 \angle 37^\circ \text{ KVA}$$

Para una compensación reactiva de 1,450 KVAR, la potencia fluyente es de:

$$N_{PE} = 1,360 + j 1,025 - j 1,450 = 1,360 - j 425$$

$$N_{PE} = 1,424 \angle -17.3 \text{ KVA}$$

La compensación variable se muestra en las fig. 29 y 30

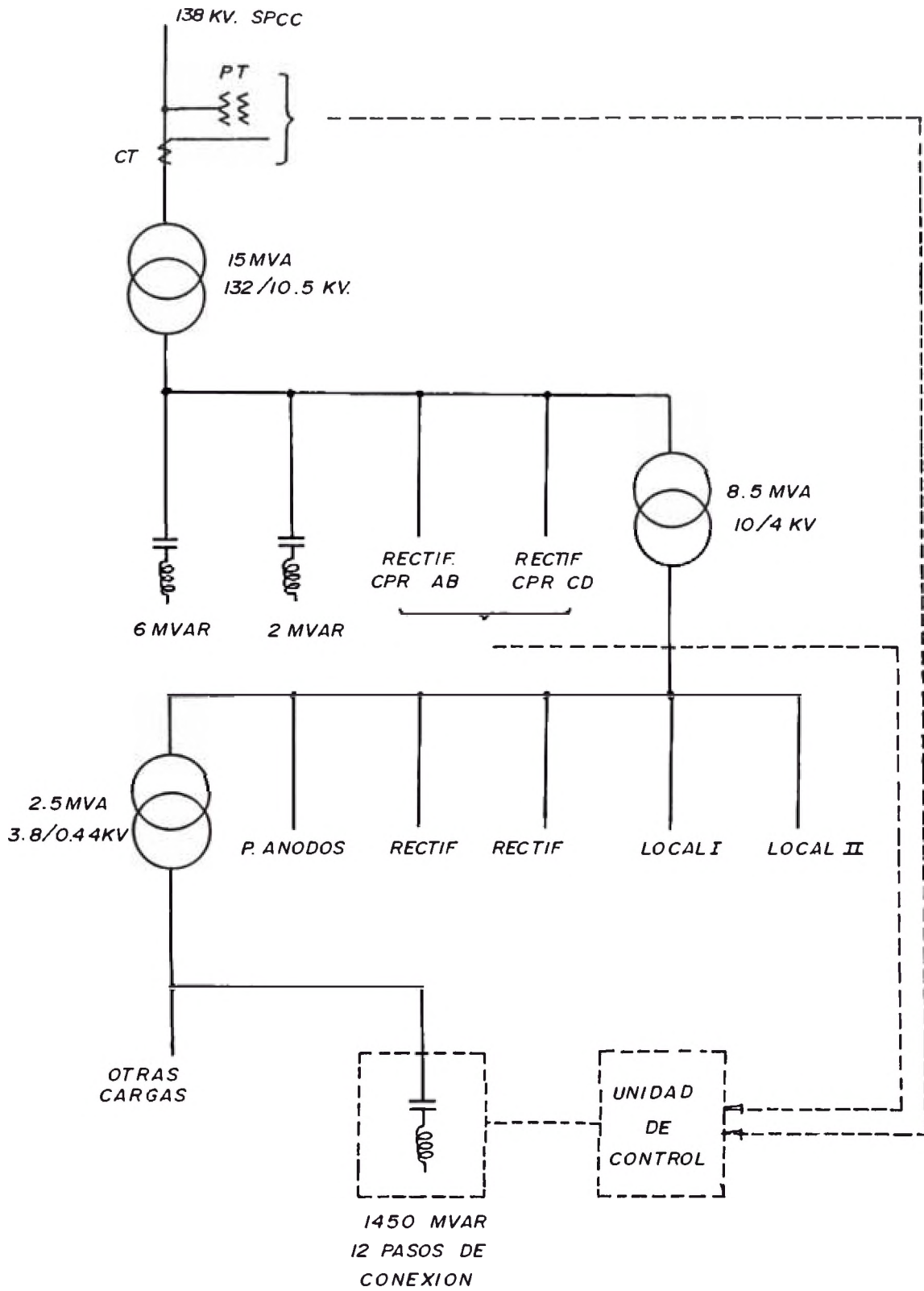


Fig. 29 Compensación capacitiva con CPR

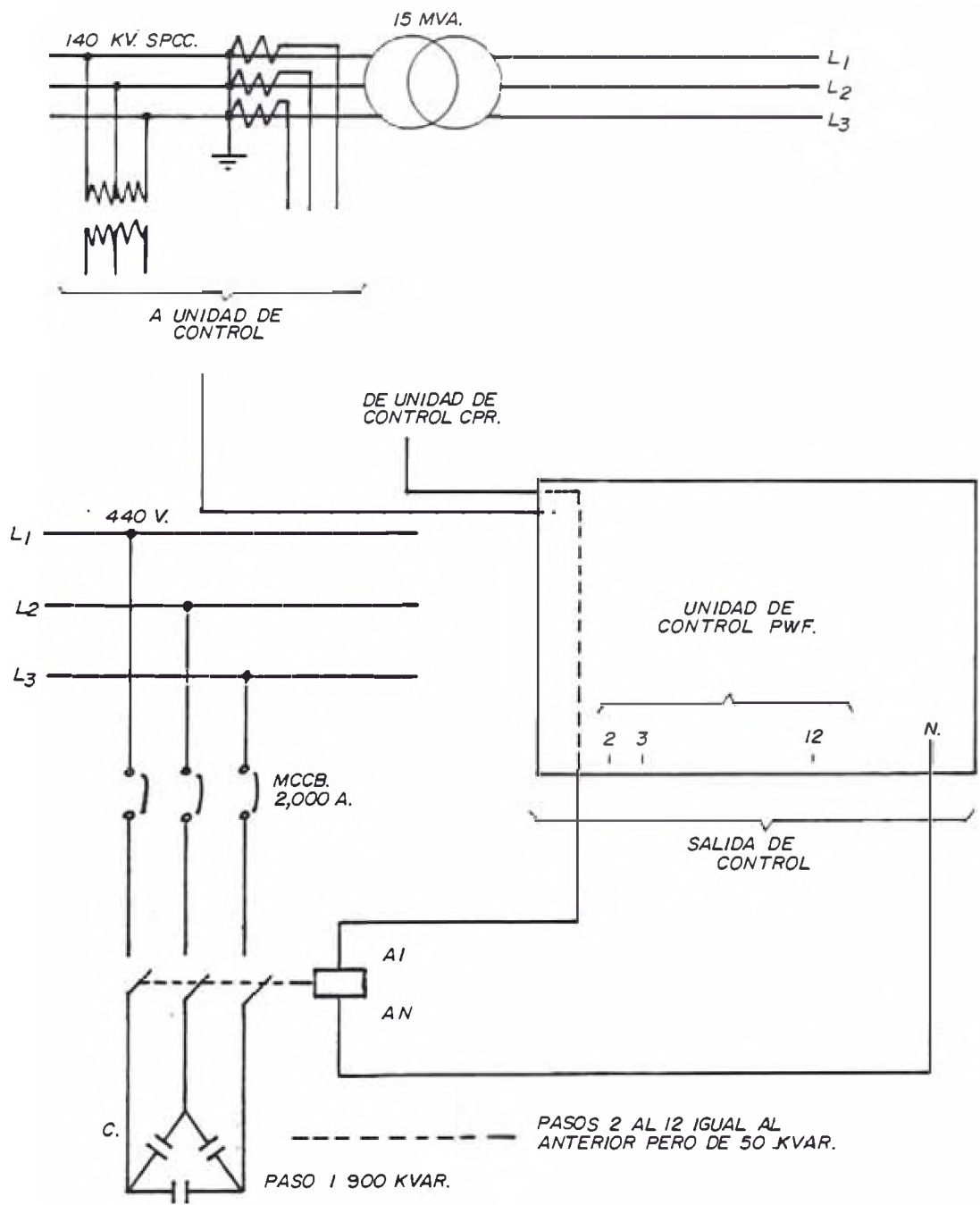


Fig. 30 Diagrama de principio de equipo de control del factor de potencia en baja tensión

Como alternativa, a fin de minimizar el efecto de la constante conmutación, especialmente en el paso 1 (900 KVAR), pueden utilizarse dispositivos de estado sólido (Relés SCR).

5.2. Distribución en 3.8 KV

La alimentación de las secciones electrolíticas de láminas de a rranque y 1ra. liberadora, se realizará con el rectificador de 21 KA. Sin embargo, se presentan problemas en el disparo de los ti ristores debido al bajo valor de tensión requerido para operar es ta s secciones (32 VDC); así, de acuerdo con las fórmulas 3.1 y ta bla 9, tap estrella 1, tendríamos un ángulo de conducción de 71° ($I_{DC} = 20,000$ amperios). Alimentando al transformador con 3.8 KV, para las mismas condiciones de carga, se obtiene un ángulo de con ducción de 31° .

Para efectuar esta modificación, utilizaremos el interruptor 52FE (Anteriormente designado para la planta de alambrón de la amplia ción original). La configuración final en 10 y 3.8 KV, se muestra en el plano 6.

5.3. Sistemas de protección y medición

5.3.1. Circuitos 10 KV

Se sigue el lineamiento del diseño original, según se mues tra en el plano 6. Asimismo, se mantiene la protección ori ginal para el circuito de alimentación a los condensadores de 2 MVAR a través del interruptor 52MS.

5.3.2. Circuito 3.8 KV

Según la fórmula 3.3, la corriente en el primario del trans formador del rectificador de 21 KA para las condiciones de carga anteriormente descritas, será:

$$I_{RMS} = 0.817 I_d/h = 165 \text{ amperios}$$

Este valor es inferior al del equipo de corriente; sin em bargo, por utilizarse cables unipolares, será necesario in cluir la protección por fuga a tierra.

CAPITULO VI

MEDIA Y BAJA TENSION EN CASA TANQUE

Consideraciones. Media tensión en casa tanque. Ampliaciones en baja tensión.

6.1. Consideraciones

Media tensión. La alimentación a los 02 rectificadores CPR exigirá la instalación de 2 S.E. de 10 KV en la casa tanque.

Baja tensión. De acuerdo con lo visto anteriormente, la capacidad de la máquina instalada permitirá absorber el incremento de producción bajo mínimas modificaciones. Según se muestra en el "flow sheet" de la figura 1, no existirá inclusión de equipo de proceso y manejo de materiales; sin embargo, existen dos puntos a considerar:

- . Ampliación en el sistema de bombeo.
- . Sistemas auxiliares de rectificadores CPR.

6.2. Media tensión en casa tanque

La recepción de la alimentación a los rectificadores CPR, en 10 KV, se realizará a través de sendos módulos, ubicados en las proximidades del tiristo-transformador CPR. El equipamiento en 10 KV se detalla a continuación:

TABLA 23. EQUIPAMIENTO 10 KV CPR RECEPCION EN CASA TANQUE

DISPOSITIVO	CANTIDAD	DESCRIPCION
52M CPR2	2 Pz.	Interrupor en volumen reducido de aceite 12 KV, 600 A, 60 Hz, 18.4 KA, trifásico
LA	2 Pz.	Pararrayos cerámico (Line Arrester) 14 KV, 60 Hz
DS	2 Pz.	Seccionador 12 KV, 1,200 A
HHF	2 Pz.	Seccionador fusible 12 KV, 5 A, 60 Hz
CT	2 Jg.	Transformador de corriente 600/5 A, 60 Hz, 10 KV, 40 VA

Como se puede apreciar en la tabla, se ha previsto un pararrayos cerámico con su correspondiente seccionador y un seccionador fusible con un transformador auxiliar para control y sincronización del equipo electrónico.

El plano 10 muestra la disposición típica, incluyendo el rectificador CPR. Se ha considerado la protección por sobrecorriente (51).

En el plano 11 se muestra la ubicación de ambos rectificadores CPR. Por un lado, es conveniente tener un control centralizado de las maniobras de los rectificadores y, por otro, los equipos de interrupción y protección se ubican junto a los rectificadores.

6.3. Ampliaciones en baja tensión

6.3.1. Sistema de bombeo

El uso de la corriente periódica reversible supone un incremento en el flujo de electrolito, habiéndose determinado, en los ensayos a nivel piloto, que se requiere un incremento del 40% del flujo actual para operar con una corriente efectiva de 320 A/m². Bajo la premisa de mantener invariables los parámetros de circulación de electrolito, excepto el flujo, el incremento de potencia de bombeo requerido es:

$$P \text{ bombeo} = 55 \frac{\text{KW}}{\text{Bomba}} \times 4 \text{ bombas} \times 0.4$$

$$P \text{ bombeo} = 88 \text{ KW}$$

Se requiere, en consecuencia, la adición de 02 bombas de circulación en el sistema de bombeo de Nave Central. El diagrama unifilar del tablero de circulación se muestra en la figura.

Como puede observarse, el conductor de 750 MCM, alimenta al sistema de circulación y al sistema de filtrado y auxiliar.

El incremento en la capacidad de bombeo plantea 2 alternativas:

1. Cambiar el cable de alimentación por otro de mayor capacidad
2. Independizar el sistema de filtros mediante una línea de alimentación de 440 V.

Fácilmente se deduce que la mejor alternativa es independizar ambos sistemas.

. Circulación:

La corriente en el sistema de circulación es:

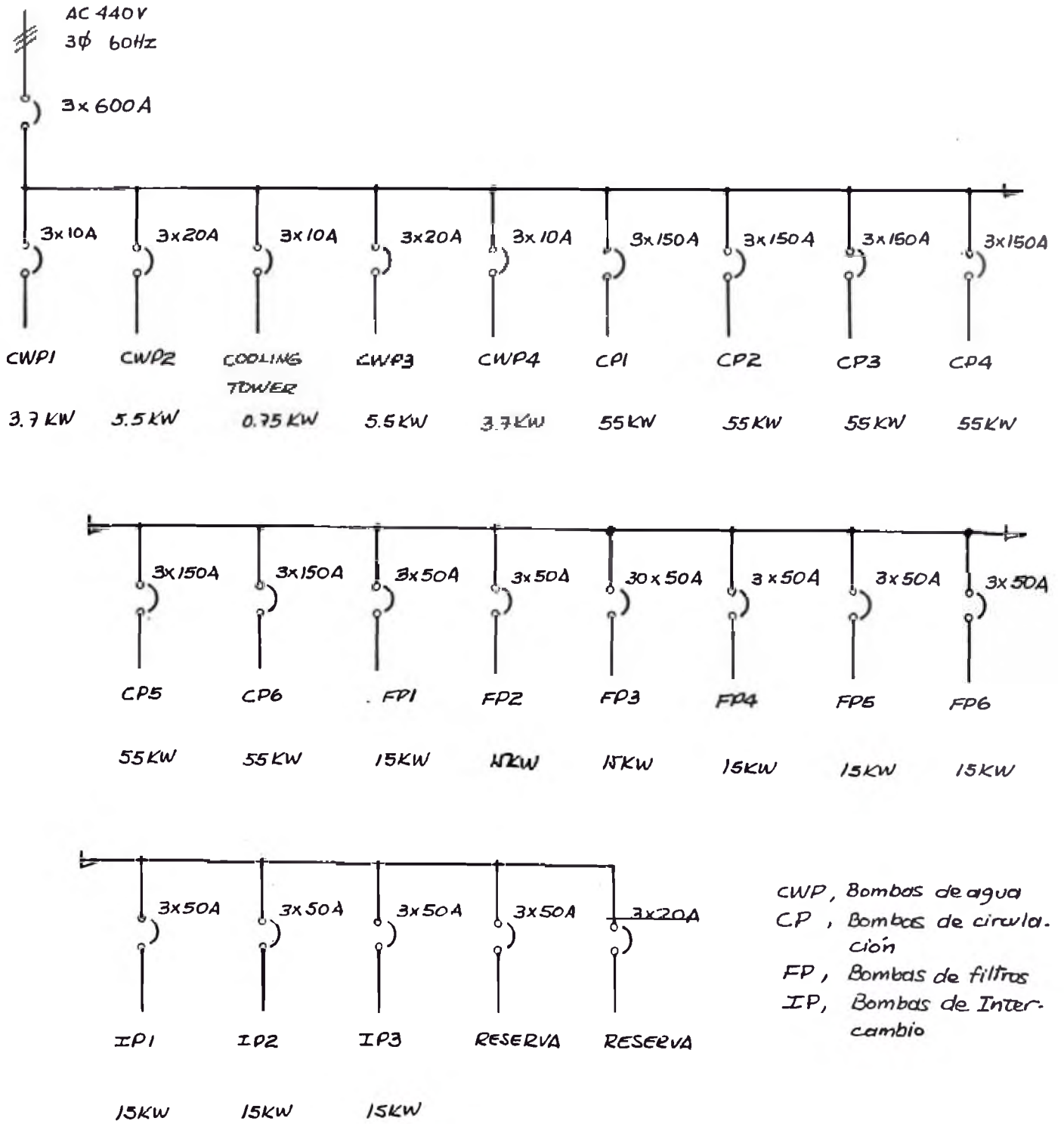


Fig. 31 Tablero de circulación y equipos auxiliares

$$I = \frac{55,000 \times 6}{3 \times 440 \times 0.8} = 542 \text{ amperios}$$

• Filtros y auxiliares:

La corriente máxima en filtros y auxiliares es

$$I = \frac{154,150}{3 \times 440 \times 0.8} \times 253 \text{ A}$$

Y la caída de tensión para el conductor # 4/0 AWG de alimentación es:

$$V = (0.346 \text{ mV/Am})(253 \text{ A} \times 120 \text{ m}) = 10.5 \text{ V}$$

En consecuencia, la modificación en el sistema de circulación implica la instalación de un nuevo conductor de alimentación y tablero de fuerza para independizar las bombas de filtros y auxiliares.

6.3.2. Sistemas auxiliares de rectificadores CPR

Las alternativas de refrigeración para el transformador y rectificadores CPR, están limitadas por la necesidad de instalar los equipos en un ambiente adecuado que los proteja de la acción agresiva del medio ácido circundante.

En consecuencia, los sistemas de refrigeración serían:

Transformador ; Circulación forzada de aceite y aire :
OFAF

Rectificador ; Circuito cerrado de agua destilada y agua cruda con torre de enfriamiento :
WFWF

Sala de equipos ; Recirculador y filtro de aire

Las potencias destinadas para los equipos de refrigeración son:

Transformador

Bomba de aceite: 5 KW

Ventiladores ; 2 KW x 2 = 4 KW

Rectificadores

Bomba de agua destilada: 2 KW

Bomba de agua cruda : 3 KW

Ventilador de torre de enfriamiento: 1 KW

Adicionalmente, como equipos auxiliares dentro de los ambientes, consideramos:

2 ventiladores	2 KW
Salidas de fuerza 440 V	20 KW
Iluminación	10 KW
Salidas de fuerza 220 V	10 KW
Equipo acondicionador de aire	10 KW

En consecuencia, la potencia requerida para cada sistema - CPR será (440 V)

$$P = 5 + 4 + 2 + 3 + 1 + 2 + 10 + 10 + 0.3 (20 + 10) \\ = 46 \text{ KW}$$

En el caso del rectificador que alimenta a la nave AB, la alimentación de los sistemas auxiliares será:

$$I = \frac{46,000}{3 \times 440 \times 0.8} = 43.6 \text{ Amperios}$$

$$I_{dis} = 60 \text{ Amperios}$$

Para el conductor # 2 AWG, la caída de tensión es:

$$V = (0.938 \text{ mV/Am})(60 \text{ A})(280 \text{ m})/1000 = 15.8 \\ = 3.6\%$$

Para la alimentación en 220 V, consideramos un transformador 440V/220V, 3 ϕ , 25 KVA de potencia.

En el caso del rectificador CPR de nave CD, el cable de 440 V será # 4 AWG, la alimentación en 220 V será independiente con conductor # 4 AWG.

La distribución propuesta se muestra en la fig. 32

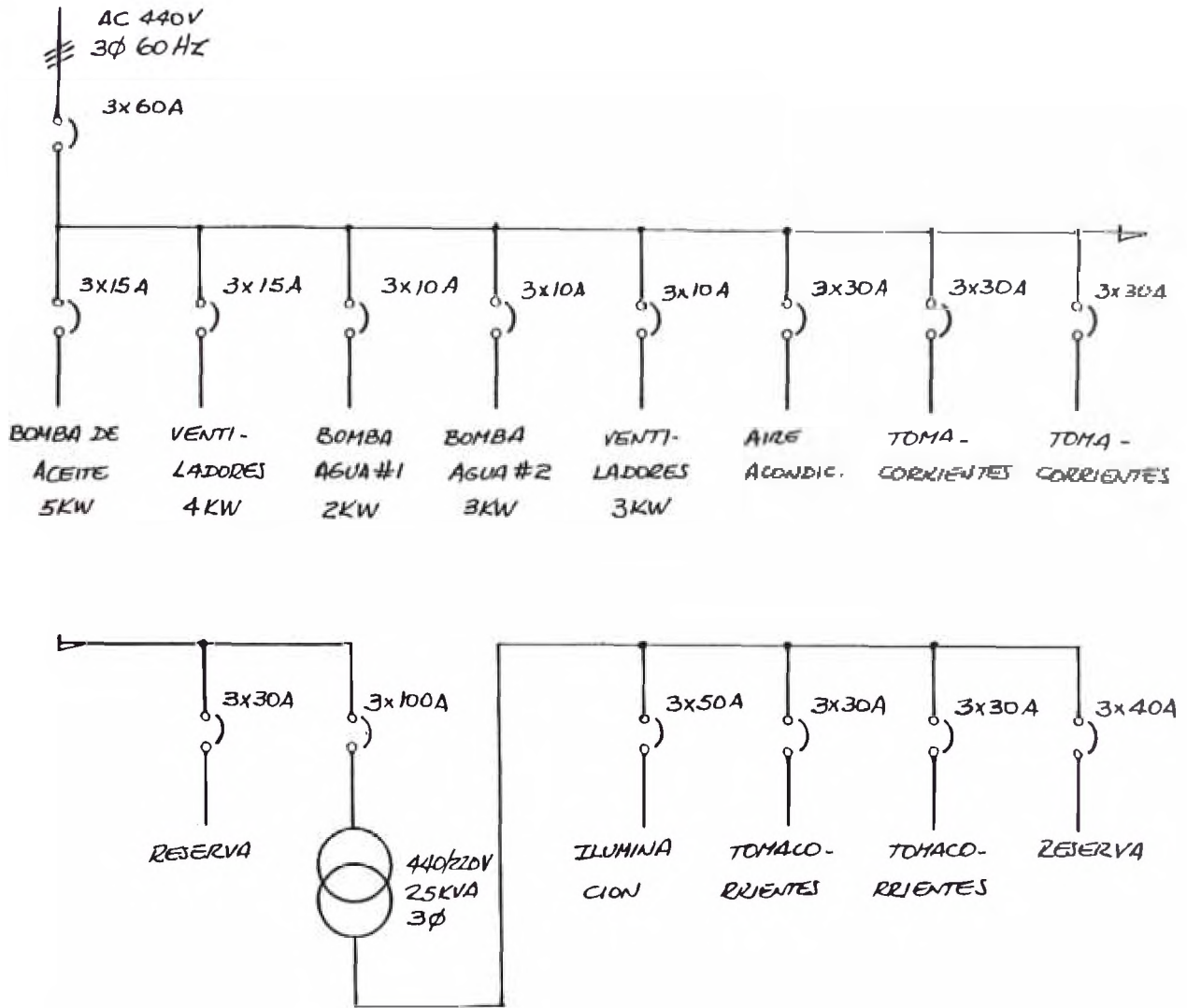


Fig. 32 Alimentación equipo auxiliar CPR

TABLA 24 . POTENCIA INSTALADA EN BAJA TENSION (KVA)

Bombas circulación (2 Pz.)	110
Sistemas auxiliares rectificadores:	
Transformador (2 Pz.)	18
Rectificadores (2 Eq.)	12
Equipo misceláneo	104

Total	244 KVA

El balance de energía para la S.E. de Casa Tanque sería:

Potencia sub-estación	2,500 KVA
Consumo actual de potencia	1,315 KVA
Incremento consumo por CPR	300 KVA

CAPITULO VII

ASPECTOS TECNICO-ECONOMICOS. COMPARACION CD VS CPR

Perfil técnico económico proyecto de ampliación. Introducción. Resumen del proceso. Inversión. Costos de operación. Ingresos. Análisis económico. Comparación CPR Vs CD. Introducción. Bases de comparación. Desviación de los datos de costos. Ventajas y desventajas con CPR (Comparado con CD).

7.1. Perfil técnico económico. Proyecto de ampliación de la Refinería de Cobre de Ilo por el proceso CPR a 58,000 TM/Año

7.1.1. Introducción

Se elabora el presente perfil con el propósito de evaluar técnica y económicamente, el proyecto CPR de ampliación de la RCu Ilo en 58,000 TM anuales adicionales.

7.1.2. Resumen del proceso

El sistema de refinación CPR consiste en el uso de altas densidades de corriente, la que puede llegar hasta alrededor de 350 A/m². Con el objeto de evitar la polarización a esta densidad, se invierte periódicamente el sentido de la corriente por breves instantes.

Como consecuencia del uso de mayor densidad de corriente hay un aumento en la producción que puede llegar hasta un 40%, dependiendo del amperaje utilizado, sin necesidad de ampliar físicamente el número de celdas electrolíticas. Como consecuencia de la mayor intensidad de corriente, hay una reducción en la eficiencia de corriente que redundará en un mayor consumo de energía eléctrica; pero, al mismo tiempo, hay un ahorro por el menor consumo de vapor.

Las pruebas realizadas a nivel piloto confirman la presun-

ción de obtener una buena calidad en el producto, ya que existe una sola fuente de abastecimiento de materia prima.

7.1.3. Inversión

La inversión necesaria para la ampliación a 208,000 TM/Año mediante la CPR, ascenderá en millones de dólares a:

Planta electrolítica	26,672
Planta de ánodos	<u>32,967</u>
Total inversión	59,639 millones de US\$
	(Precios 1,986)

El desagregado de la inversión por tipo de moneda a desembolsarse durante la construcción, es el siguiente:

	Millones US\$	
Moneda nacional	14.254	(23.9%)
Moneda extranjera	45.385	(76.1%)

Con fines de evaluación, la distribución que presentará la inversión es la siguiente:

Rubro	Millones US\$	
Moneda nacional (De la inversión)	14.5	19.3%
Moneda extranjera (De la inversión)	26.7	44.8%
Impuestos	15.7	31.4%
Capital de trabajo	<u>2.7</u>	<u>4.5%</u>
	59.6	100 %

7.1.3.1. Costos utilizados

Para estimar los costos de inversión, se ha utilizado los siguientes criterios:

- . Unidades monetarias: Los costos de inversión se han expresado en dólares 1986.
- . Construcción: La implementación de la tecnología

a CPR se considera que se efectuaría en el plazo de 2 años.

- . Fletes, seguros y derechos de importación: Se ha tomado una muestra significativa de los equipos a importarse, con los cuales se ha calculado, en promedio, los porcentajes del precio FOB para el caso de fletes y seguros y del precio CIF para los derechos de importación.
- . Capital de trabajo: Se ha calculado la cantidad inicial necesaria de cobre blister y ánodos para cumplir con los requerimientos del proceso , el cual considera los siguientes factores:
 - . Stock de blister
 - . Cobre en proceso en hornos y planta electrolítica
 - . Stock de ánodos

7.1.3.2. Distribución de la inversión

A continuación, se presenta el desagregado de la inversión distribuida en sus rubros más significativos. Las inversiones en planta de ánodos se han efectuado en la base de optimización del proceso y renovación de equipos.

TABLA 25. INVERSIONES PLANTA CPR (58,000 TM/AÑO ADICIONALES)

DESCRIPCION	MONEDA	MONEDA	MILES US\$
	NACIONAL	EXTRANJERA	TOTAL
Equipos eléctricos y mecánicos	2,511	9,220	11,731
Embalajes, fletes y seguros	91	1,277	1,368
Sub-Total	2,602	10,497	13,099
Ingeniería y administración	480	-	480
Contingencias (15%)	390	1,575	1,965
Total inv. fijas (s/imp)	3,472	12,072	15,544
Impuestos a la imp.	-	8,450	8,450
Total inv. fijas (c/imp)	3,472	20,522	23,994
Capital de trabajo	2,678	-	2,678
Financiamiento requerido	6,150	20,522	26,672

TABLA 26. INVERSIONES EN PLANTA DE ANODOS

DESCRIPCION	MONEDA	MONEDA	MILES US\$
	NACIONAL	EXTRANJERA	TOTAL
Planta de ánodos	5,861	10,966	16,827
Embalajes, fletes y seguros	212	1,751	1,963
Sub-Total	6,073	12,717	18,790
Ingeniería y administración	1,120	-	1,120
Contingencias	911	1,908	2,819
Total inv. fijas (s/imp)	8,104	14,625	22,729
Impuesto a la imp.	-	10,238	10,238
Total inv. fijas (c/imp)	8,104	24,863	32,967
(Financiamiento requerido)			

7.1.4. Costos de operación

7.1.4.1. Resumen

Los costos de operación incrementales generados - por ampliar la capacidad de la RCu a 58,000 TM/Año, ascendería a 5.2 millones de dólares por año a precios de fines de 1986.

7.1.4.2. Criterios utilizados

Se han considerado los siguientes criterios:

- . Los costos se han calculado desde el punto de vista incremental.
- . Se ha efectuado la discriminación de costos fijos y variables, afectándose los que se modificarían al incrementarse la capacidad de producción.
- . Respecto a la mano de obra, se ha considerado únicamente al personal adicional a incrementar a la actual organización.

TABLA 27. COSTOS DE OPERACION INCREMENTALES

COSTOS FIJOS	US\$/AÑO		
Mano de obra			166,000
Mantenimiento			1'100,000
Total costos fijos			1'266,000
 COSTOS VARIABLES			
	Consumo	Costo unit.	
		US\$	
Electricidad	26'632,000 Kwh	0.04	1,065,280
Petróleo	2'636,000 Gal	1.00	2'636,000
Troncos eucalipto	997 TM	114.00	113,000
Otros			100,000
Total costos variables			3'914,938
 TOTAL COSTOS OPERACION			 5'180,938

7.1.5. Ingresos

7.1.5.1. Criterios utilizados

- . Maquila base, 242 US\$/TM (Vigente a la actualidad)
- . Se incluyen los ingresos incrementales que se tendrían por la recuperación de los metales preciosos de los lodos anódicos, por un total de US\$ 480,000 por año.
- . Producción incrementada: 58,000 TM/Año.

7.1.5.2. Ingresos

El ingreso incremental es:

$$242 \times 58,000 + 480,000 = 14'516,000 \text{ US\$/Año}$$

7.1.6. Análisis económico

7.1.6.1. Criterios utilizados

- . Se consideran los flujos económicos a nivel de precios constantes para toda la vida útil del proyecto.
- . Se asume que el proyecto se construiría en un período de 24 meses, incluyendo su puesta en marcha.
- . El ingreso incremental es US\$ 14'516,000 por año, producto de la comercialización de la producción adicional.
- . Los costos de operación se estiman en US\$ 5'180,000 por año.
- . Vida útil del proyecto: 15 años.

7.1.6.2. Rentabilidad

Tomando como indicadores de la rentabilidad del

proyecto a la Tasa Interna de Retorno y el Valor Actual Neto, obtenemos los siguientes resultados:

	TIR	VAN (8%) US\$ MILLONES
Caso "base" (Después de impuestos)	9.8%	8.9
Alternativa A (Sin impuestos)	15.1%	27.5

7.1.6.3. Análisis de sensibilidad

Se ha efectuado un análisis de sensibilidad del proyecto con respecto a:

- . Inversión
- . Costos de operación
- . Ingresos

Se han considerado variaciones del 10%. Los resultados se pueden apreciar en la siguiente tabla.

TABLA 28. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

	TIR		VAN (8%)(US\$ MILL.)	
	1	2	1	2
Base	9.8%	15.1%	8.9	27.5
Inversión + 10%	8.6%	13.7%	2.9	23.5
Inversión - 10%	11.2%	16.8%	14.8	31.6
Costos de op. + 10%	9.0%	14.3%	5.0	23.7
Costos de op. - 10%	10.5%	16.0%	12.7	31.6
Ingresos + 10%	11.7%	17.4%	19.5	38.2
Ingresos - 10%	7.6%	12.6%	- 1.8	16.9
SENSIBILIDAD A LA TASA DE INTERES (VAN) (US\$ MILL.)				
Alternativa	5%	10%	15%	20%
1	28.3	- 1.0	-18.3	-29.3
2	55.9	17.7	0.3	-10.6

7.2. Comparación CPR Vs CD proyecto de ampliación de la Refinería de Cobre de Ilo a 58,000 TM/Año

7.2.1. Introducción

Se elabora la siguiente comparación para evaluar económicamente el proyecto de ampliación CPR, bajo una base de 58,000 TM/Año como el nivel nominal de producción (Incrementada). Aunque existen algunas diferencias en los costos operacionales favorables a CPR, puede asumirse que cualquier variación se aplicará igualmente a ambas alternativas del proceso. Los tamaños de las celdas y el espaciamiento entre electrodos son los mismos para CD y CPR, así como el número de ánodos y cátodos por celda.

7.2.2. Bases de la comparación

- a. El sistema de refinación CPR consiste en el uso de altas densidades de corriente, la que puede llegar hasta alrededor de 350 A/m². Como consecuencia del uso de mayor densidad, puede conseguirse un incremento de producción del orden de 58,000 TM/Año en la Refinería de Cobre de Ilo, sin recurrir a la erección de nuevas celdas electrolíticas.
- b. Con el fin de garantizar la producción de ánodos necesarios para el proceso a ser producidos por la planta de ánodos, se requiere una inversión en equipos del orden de los US\$ 32'967,000. Esta inversión es aplicable en ambos casos, por lo que no será utilizada en la presente comparación.
- c. La planta CD, utilizada como base de la comparación, es una planta convencional de 58,000 TM/Año, de características similares a la actual y que se supone tendría que

ser construida dentro de las actuales instalaciones. Un estimado de sus características y costos, se muestra en el anexo.

- d. Suponemos un tiempo de vida del proyecto, período de construcción y puesta en marcha, de 15 años y 24 meses respectivamente y para ambos casos.
- e. Los costos de energía eléctrica y producción de vapor son tomados de valores prácticos para la actual planta CD.

7.2.3. Derivación de los datos de costo

7.2.3.1. Costos de inversión

Los costos para ambos casos han sido derivados de los datos obtenidos en la instalación y ejecución del módulo piloto CPR, estudios de ampliación de refinerías similares (Ver bibliografía) y costos de inversión en la Refinería de Cobre. Los errores de precisión en los resultados, en todo caso son similares para los proyectos CD y CPR. El interés utilizado para la derivación de costos es del 8% para todos los casos.

7.2.3.2. Cobre en inventario

Una de las ventajas de la tecnología CPR desde el punto de vista financiero, es la economía del stock de cobre en proceso. La siguiente tabla muestra los inventarios de cobre requeridos para diferentes valores de densidad de corriente.

TABLA 29: INVENTARIOS DE COBRE

TECNOLOGIA	DENSIDAD	TM-MES/TM (Cu ELECTROLITICO)
DC	220 A/m ²	0.912
CPR	300 A/m ²	0.723
CPR	320 A/m ²	0.696
CPR	340 A/m ²	0.672

Nota:-Producción mensual para los inventarios

-Fuentes: TAMANO REFINERY y RCu

-El inventario sólo se refiere a la planta de electrólisis

Para una planta de 150,000 + 58,000 = 208,000 TM/Año, el cobre en inventario es:

$$\text{DC (220 A/m}^2\text{)} \frac{208,000 \text{ TM/Mes}}{12} \cdot 0.912 \text{ TM-Mes/TM} \\ = 15,808 \text{ TM}$$

$$\text{CPR (320 A/m}^2\text{)} \frac{208,000 \text{ TM/Mes}}{12} \cdot 0.696 \text{ TM-Mes/TM} \\ = 12,064 \text{ TM}$$

La diferencia en cobre de inventario es de 3,744 TM a favor de la planta CPR (Esta diferencia está considerada en la inversión inicial, costos de operación).

7.2.3.3. Energía eléctrica y vapor

En las siguientes tablas se muestran los parámetros de energía para ambas plantas (Ver Anexo I)

TABLA 30. ENERGIA ELECTRICA

DENSIDAD	E (DC)	E (AC)	Energía Planta(1)
DC 214 A/m ²	220 KWh/TM	234 KWh/TM	325 KWh/TM
CPR 320 A/m ²	346 KWh/TM	367 KWh/TM	458 KWh/TM

(1) Contactos húmedos

TABLA 31. VAPOR Vs ENERGIA ELECTRICA (ELECTROLITO A 65°C)

DENSIDAD	VAPOR (KWh/TM)	EFECTO JOULE (KWh/TM)	TOTAL (KWh/TM)
DC 214 A/m ²	291.5	215	506.5
CPR 320 A/m ²	94.9	349	443.9

7.2.3.4. Mano de obra, suministros y servicios

En esta comparación asumiremos que las diferencias en este rubro entre ambas alternativas, no es significativa frente a los costos anteriormente considerados. En todo caso, es presumible cierta ventaja en la alternativa CPR si tomamos en cuenta que básicamente requerirá menos personal para cubrir el incremento de operaciones.

7.2.3.5. Análisis de sensibilidad (VAN 8%)

Inversión + 10%	US\$ miles	9,817
Inversión - 10%		7,467
Energía + 10%		9,038
Energía - 10%		11,123

TABLA 32. COMPARACION SIMPLIFICADA CPR Vs CD (US\$ x 1,000)

(AMPLIACION A 208,000 TM/AÑO)

COMPONENTES DE COSTOS	Descontado (15 años) al 8% de interés	
	Diferencias VAN	
	CD	CPR
Inversión inicial	0	- 13,708
Valor retorno cobre en proceso (15,808 - 12,064) = 3,734 x US\$ 1,369/TM x 0.315	0	+ 1,616
COSTOS ANUALES		
Energía eléctrica		
. Activa		
Prod. anual x KWh/TM x US\$/KWh		
208,000 TM/Año x (458 - 325) x 0.035		
= 968		
. Máxima demanda		
12 meses x KW x US\$/KW		
12 x (10,354 - 6,930) x 6.076		
= 250		
Vapor		
Producción anual x T vapor/TM x US\$/T		
vapor		
208,000 (0.46 - 0.15) x 15.25		
= - 983		
Total costos anuales: 235		
Descontado a 15 años al 8%, factor 8.56	0	+ 2,012
Diferencia comparativa en valor actual neto (A 15 años)	0	- 10,018
Valor presente (-2 años al 8%)		- 8,642
(Miles de dólares)		

TABLA 33. COMPARACION A INICIO DE OPERACIONES (VAN)

ENERGIA	DIF. COSTO	INTERES	5%	10%	15%	20%
ELECT.	ANUAL	uspwf	10.38	7.61	5.85	4.68
- 20%	-8.6		11,332	12,546	13,128	13,415
- 10%	113.0		10,070	11,622	12,417	12,847
+ 10%	357.0		7,537	9,766	10,990	11,706
+ 20%	479.0		6,271	8,838	10,277	11,135
+ 30%	600.0		5,015	7,917	9,570	10,570
Valor de retorno de inventario (Miles US\$)			2,465	1,277	630	333

COMPARACION AL VALOR PRESENTE (17 AÑOS)

ENERGIA	5%	10%	15%	20%
ELECTRICA				
- 20%	10,278	10,369	9,927	9,316
- 10%	9,134	9,605	9,389	8,922
+ 10%	6,836	8,071	8,310	8,129
+ 20%	5,688	7,304	7,771	7,733
+ 30%	4,549	6,543	7,236	7,340

7.3. Ventajas y desventajas con CPR (Comparado con CD)

Sin considerar el aspecto económico desarrollado en la sección 7.2. del presente capítulo, en donde se ha visto que, económicamente, la alternativa CPR es más conveniente, debemos tomar en cuenta los siguientes tópicos:

7.3.1. Ventajas operacionales

El uso de CPR permite la electrorrefinación del cobre a mayores intensidades, manteniendo la calidad del cobre, la cual cumple con los requerimientos (Del mercado internacional) y evitando la pasivación anódica.

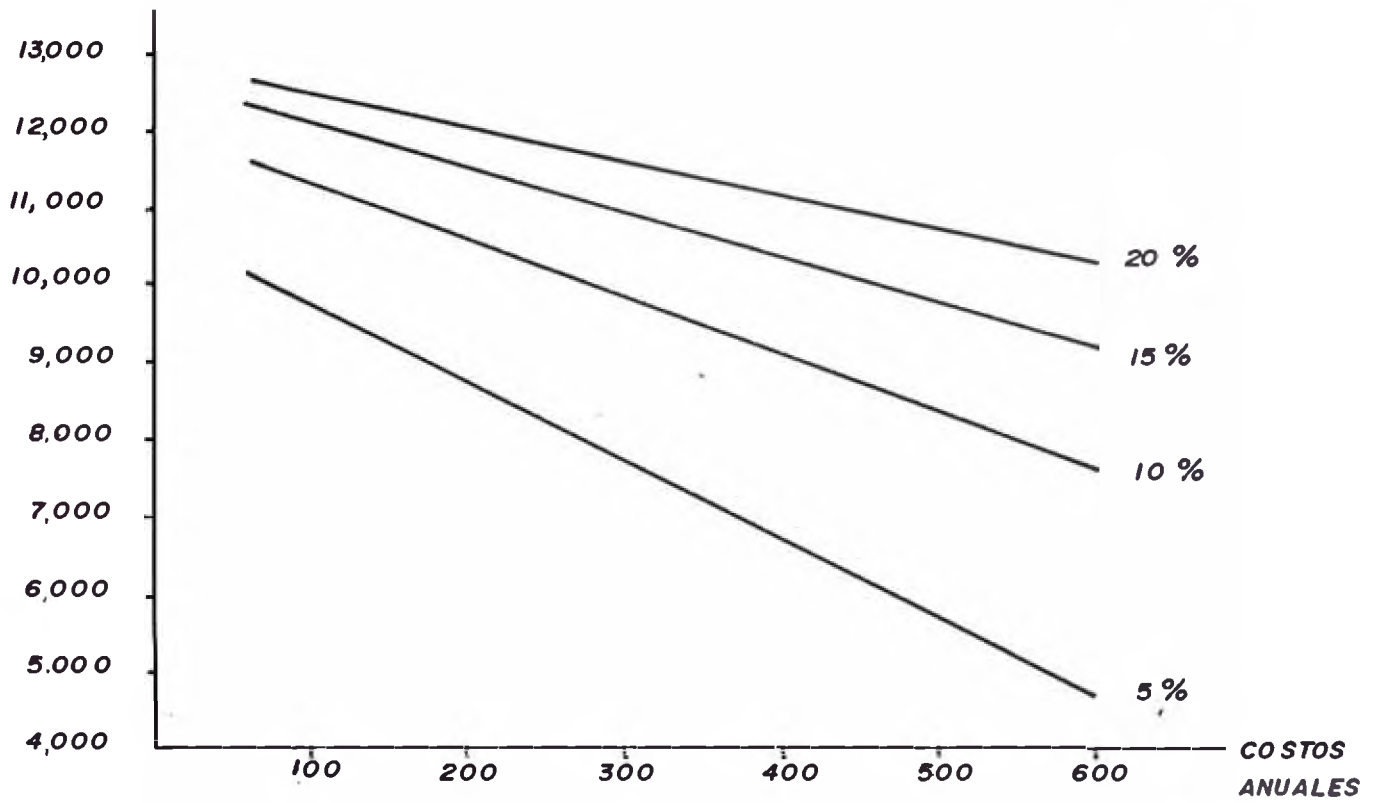


Fig. 33 Costos de operación anuales Vs. dif. CPR-CD en US\$ x 10³
(A inicios de operaciones)

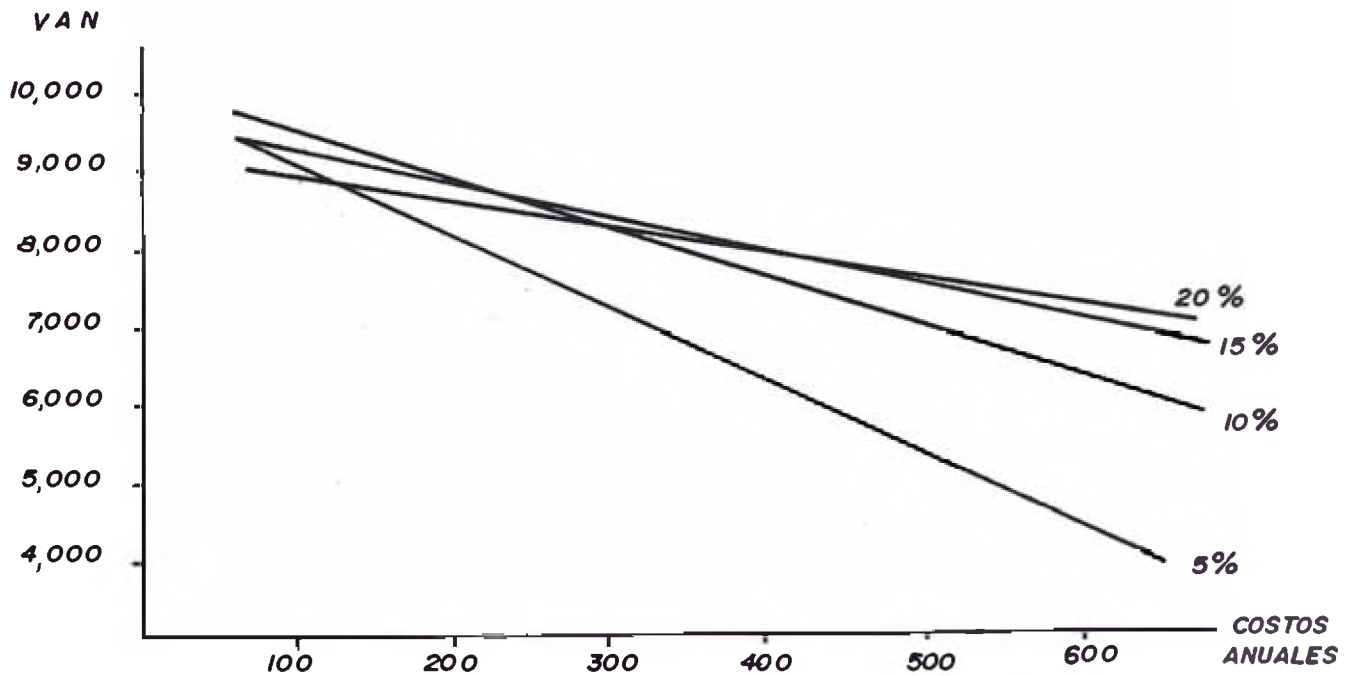


Fig. 34 Costos de operación anuales Vs. dif. CPR-CD en US\$ x 10³
(Al valor presente)

Calidad catódica

- Se consigue una suave superficie de electrodeposición , debido a la mejora de la transferencia iónica en la capa adyacente al catolito.
- Se mantiene la calidad química del cátodo (Niveles similares de impurezas para similares composiciones de electrolito y reajustes).

Pasivación de los cátodos

La supresión de la polarización de los electrodos, implícita en el uso del CPR, permite el uso de grandes densidades sin riesgo de caer en la pasivación. El índice de la pasivación anódica debido a la presencia de corrientes altas localizadas en CD, es prácticamente nulo con CPR, cuya justificación siempre reside en incremento de producción, con la protección contra la pasivación como un bono.

7.3.2. Desventajas operacionales

Aparte del aspecto de costos, la intensificación del proceso de refinación debido a la CPR, puede resultar en problemas operativos, los cuales deben ser superados con el equipo correcto y la habilidad de la supervisión y el personal obrero para mantener la eficiencia. Los principales factores a considerar son:

- Manejo de electrodos:

Preparación de ánodos (Peso consistente, calidad física, alineamiento).

Preparación de láminas de arranque y precisión de la siembra.

- Inspección de celdas:

Problemas de contacto eléctrico.

Rápida detección y corrección de cortocircuitos.

- Control de electrolito:

Flujo y distribución de flujo en las celdas.

Filtrado para mantener la composición química.

Aditivos y temperatura del electrolito.

Las desventajas potenciales ligadas a la introducción de la CPR son, de hecho, una extensión de los problemas que pueden ocurrir con CD. Cualquier problema sobre el funcionamiento de la planta puede ser atribuido a los factores citados.

7.3.3. Energía

Energía eléctrica

Debido a que es necesario utilizar el período inverso en la CPR, la eficiencia del ciclo es inferior al 100%; adicionalmente, disminuye la eficiencia de corriente y se incrementa el voltaje de celda. Estos tres factores conllevan al incremento del consumo de energía eléctrica.

Vapor

El incremento del consumo de energía eléctrica se traduce en calentamiento por efecto joule del electrolito prácticamente en su totalidad. Debido a la necesidad de mantener la temperatura del electrolito (A 63°C), se utiliza vapor. Como consecuencia de lo anterior, se experimenta una disminución en el consumo de vapor; sin embargo, para la RCu el costo de la energía eléctrica es mayor que el de vapor, existiendo, en consecuencia, un balance negativo para la CPR en cuanto a la energía.

TABLA 34.

TABLA COMPARATIVA CD VS CPR (RCu ILO 208,000 TM/AÑO)

PARAMETRO	CD	CPR
Densidad de corriente (A/m ²)	214	355
Densidad efectiva (A/m ²)	214	320
Ef. de ciclo (%)	100	90.1
Ef. de corriente (%)	97	93
Energía electrolítica (KWh/TM)	215	349.4
Energía planta (KWh/TM)	325	458
Voltaje de celda (mV)	280	380.5 (Promedio)
Producción relativa	1.00	1.38
Utilización de planta	0.95	0.90
Consumo vapor (TM vapor/TM Cu)	0.46	0.15
Inventario de cobre (Ton. blister/Ton. cátodo)	0.912	0.696
Máx. potencial a tierra (Volt.) (Condiciones normales)	112.5	78.4
Pérdidas en barras (KW)	235	336

CONCLUSIONES

1. El presente trabajo, con las características de anteproyecto en el aspecto eléctrico de la modificación a CPR de la Refinería de Ilo, si bien no abarca en su totalidad la naturaleza del proyecto, llega a definirlo en sus aspectos básicos, reflejando su factibilidad. Para tal propósito, el apoyo en las pruebas metalúrgicas obtenidas en la Refinería e información recibida de otras instalaciones similares, es determinante. En ese sentido, se tienen proyectados los cálculos básicos de consumo, el comportamiento eléctrico del circuito CPR y su influencia en el sistema eléctrico.
2. La inclusión del análisis económico tiene como objetivo facilitar - la comparación entre la planta CPR propuesta y otra planta DC, hipotética y de la misma capacidad. La base de la proyección económica ha sido derivada de la publicación "The relative merits of Periodic Current Reversal or Direct Current for new copper electric-refining tankhouses", presentado por A. McCririck, Seltrust Engineering Limited London, England, en el 110 año de reunión AIME Chicago, Illinois, February 1981 y los estudios de factibilidad realizados en la Refinería de Ilo para anteproyectos de ampliación con corriente continua. En consecuencia, las cifras mostradas sólo evalúan los valores más típicos y su principal objetivo es mostrar las opciones financieras e indicar las ventajas y desventajas de uno u otro método de refinación.
3. El capítulo VII muestra que, la mejor opción para ampliar la capacidad de la Refinería, es el cambio a CPR frente a la alternativa de construir una nueva planta CD de 58,000 TM/Año de capacidad. Esta elección es claramente definida por el aspecto económico, muy determinante, frente al aspecto técnico, en el cual prácticamente no -

existen diferencias entre CPR y CD.

4. Para definir el incremento de producción a proyectar, se han conjugado tres factores:
 - . Capacidad eléctrica disponible
 - . Valor metalúrgico óptimo de densidad de corriente efectiva
 - . Capacidad de producción de SPCC y de procesamiento de la planta - de ánodos

Según se muestra en el presente trabajo, estos factores satisfacen los requerimientos y su utilización es óptima para los 2 primeros ; sin embargo, el aprovechamiento de toda la capacidad de producción de SPCC, se llevaría a cabo a expensas de un mayor costo unitario y, lejos del alcance del cambio de tecnología de refinación, recurriendo a la erección de nuevas celdas.

5. El incremento del consumo de potencia eléctrica es del orden de los 7 MW, el cual es absorbido por el sobredimensionamiento del equipo de alta y media tensión. Adicionalmente, las ampliaciones en baja tensión se ven suplidas por los actuales equipos de transformación y distribución.

No se requiere la erección de nuevas celdas, y las mayores inversiones están concentradas en la adquisición de los equipos de rectificación, condensadores y barras de cobre. Adicionalmente, en comparación con una ampliación de producción de la misma magnitud en CD, se requiere menor cantidad de cobre en inventario (3,774 TM).

La pérdida de eficiencia eléctrica del proceso y el mayor costo de la energía eléctrica frente al vapor, incrementa el costo de producción con CPR, el cual, sin embargo, como se analiza en la comparación económica, no es suficiente como para igualar el valor actual neto de costos con CD. (La proyección hasta con un incremento de

costo de energía eléctrica del orden de 30% es favorable a la CPR en US\$ 5 millones al valor presente).

6. La adecuación del sistema de conductores DC para CPR a 33,000 A, es relativamente sencilla, bastando añadir barras a los actuales paquetes, requiriendo pocas modificaciones el recorrido de conductores. Los mecanismos de puenteo son fácilmente sustituibles, aprovechando la característica CPR por otros de mayor capacidad y bajo costo, los cuales permitirán una operación más segura y a menor costo de mantenimiento que los actuales.
7. El equipo de rectificación CPR es necesariamente tiristorizado, las variaciones en el voltaje de celda son muy acentuadas (Del orden del 18%) y las características de conmutación requeridas obvian cualquier equipamiento mecánico. Se suma a esto, el alto valor de corriente requerido.
8. La compensación reactiva (Capacitiva) planteada, basada en el criterio de una compensación "base" y otra "de punta", obedece a la necesidad de minimizar su efecto en el equipamiento eléctrico. Adicionalmente, el sistema de pago de reactiva establecido (Capacitiva e inductiva), obliga a mantener un factor de potencia cercano a la unidad, el que solamente se puede conseguir con la compensación variable. Estas consideraciones pueden ser extendidas en un estudio económico, costo equipo versus ahorro.
9. Como conclusión final, con respecto a la factibilidad económica del proyecto, podemos decir que la Refinería de Cobre se dedica a la refinación de cobre, cobrando una maquila por sus servicios, la cual, a través de todos sus años de operación, se ha mantenido muy favorable, a despecho de las variaciones del precio del cobre. Adicional-

mente, la factibilidad del proyecto se ve reforzada por cuanto la Southern Peru Copper Corporation mantiene su nivel de producción de cobre blister muy por encima de la actual capacidad de la Refinería de Cobre.

MATERIAL BIBLIOGRAFICO

1. AEG TELEFUNKEN "Automatic Power Factor Correction Equipment"
2. Baumeister, Avelone, "Manual del Ingeniero Mecánico", 9° edición
3. Bertha Josef, Schewimann, Hans Wöbking, Hermut Worz, "PCR Technique in Electrolytic Copper Refinement"
4. Comisión CPR, "Informe de visitas a Plantas Metalúrgicas", U.P. Refinería de Cobre de Ilo
5. Duby Paul Professor, "Electrometallurgy" Learning Activities 3 and 4, Department of Mining, Metallurgy and Minerals Engineering - Columbia University
6. Fuji Electric Co. Ltd, "Schematic Diagrams Copper Refinery Ilo" , 1972
7. Fuji Electric Co..Ltd., "Esquemas eléctricos normalizados"
8. Furukawa Co. Ltd., "Construcción and Erection of Copper Refinery", 1972
9. INDECO PERUANA S.A., "Conductores aislados para uso general"
10. CITECO, "Compensación reactiva en 440 V"
11. Mc Cririck, "The Relative Merits of Periodic Current Reversal or Direct Current for new copper electro-refining tankhouses", - Seltrust Limited London, England. 110th AIME Anual Meeting, Chicago, Illinois, Feb. 1981
12. MESCO INC. "Specification for thyristor PRC Rectifier Equipment"
13. Modern Power Systems, "Static VAR Compensation" by L. Abey, ASEA, Transmission Sweden, July 1986
14. M.I.T., "Circuitos Magnéticos y Transformadores"
15. Pirelli Cerper, "Conductores para instalaciones generales"
16. SIEMENS, "Manual Técnico para Rectificador CPR"
17. SIEMENS, "Revista SIEMENS", julio-setiembre 1985
18. Standard Handbook for Electrical Engineering 11° edition, Fink and Beaty (Editors)

19. Tatsuzo Kitamura, Tohru Kawakita, Yukio Sakoh, Kenji Sasaki, Design, Construction and operation of Periodic Reverse Current Process at Tamano", Symposium AIME 1976
20. Taylor George A, "Managerial and Engineering Economy", D. Van Nostrand Company Inc. 1964
21. Zopetti Gandencio, "Redes Eléctricas"