

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA USP**

GUILHERME ANTONIO RUSSI

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA
ELÉTRICO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL POR ELETRÓLISE
DE UMA PLANTA DE CLORO-SODA**

São Paulo

2021

GUILHERME ANTONIO RUSSI

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA
ELÉTRICO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL POR ELETRÓLISE
DE UMA PLANTA DE CLORO-SODA**

**Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Especialista em
Energias Renováveis, Geração Distribuída e
Eficiência Energética.**

**Área de Concentração: Eficiência
Energética.**

**Orientador: Prof. Dr. André Luiz Veiga
Gimenes**

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Russi, Guilherme

Análise da Eficiência Energética do Sistema Elétrico de Produção Industrial por Eletrólise de uma Planta de Cloro-Soda / G. Russi -- São Paulo, 2021.

95 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Eletrólise 2.Células Eletrolíticas 3.Energia Elétrica 4.Retificadores
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e estar sempre ao meu lado me guiando na jornada.

Aos meus pais Elba Russi (em memória) e Maria Lucia pela minha criação, amor e esforços realizados durante a minha formação.

A minha esposa Jéssica e filhos João Gabriel e Clara por toda a compreensão durante a elaboração desta monografia e pelo amor em família.

Ao Prof. Dr. André Gimenes pela orientação e colaboração durante o desenvolvimento desta monografia.

Aos meus professores do PECE por toda a atenção concedida e aprendizado.

A Unipar Carbocloro empresa em que trabalho.

“ Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

(Isaac Newton)

RESUMO

As indústrias eletrointensivas são consideradas grandes consumidoras de energia elétrica, desempenhando um papel fundamental para o crescimento da demanda energética do país, aumentando substancialmente os investimentos no setor de energia elétrica.

Segundo estimativas da Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia (Abrace), nos próximos cinco anos, 30% da geração de novas hidrelétricas já licitadas mas que ainda não entraram em operação serão destinados aos eletrointensivos.

Para efeito de análise a presente monografia está dividida em sete capítulos. No capítulo 1 é apresentada informações sobre o cloro. No capítulo 2 é apresentado a revisão bibliográfica com enfoque nos fundamentos dos processos de eletrólise e suas tecnologias.

No capítulo 3 são apresentadas questões relativas as topologias do sistema elétrico industrial evidenciando os equipamentos elétricos, utilizados para as alimentações do processo de eletrólise. No capítulo 4 é apresentado o detalhamento do sistema elétrico das para alimentação das eletrólises.

No capítulo 5 são apresentadas informações das medições das variáveis referentes aos consumos energéticos das células eletrolíticas:

- Células eletrolíticas empregando tecnologia diafragma tipo amianto utilizando catodo modelo MDC-55;
- Células eletrolíticas empregando tecnologia diafragma tipo PMX (fibra sintética PTFE + dióxido de zircônio) utilizando catodos modelos MDC-55 e BP-66;
- Células eletrolíticas empregando tecnologia em mercúrio;
- Células eletrolíticas empregando tecnologia em membrana;

No capítulo 6 as conclusões.

No capítulo 7 as referências bibliográficas.

PALAVRAS-CHAVE: *eletrólise, células eletrolíticas, energia elétrica, retificadores.*

ABSTRACT

The electro-intensive industries have been considered large consumers of electric energy, playing a fundamental role for the growth of the country's energy demand, substantially increasing investments in the electric energy sector.

According to estimates by the Brazilian Association of Large Industrial Energy Consumers (Abrace), in the next five years, 30% of the generation of new hydroelectric plants already tendered but which have not yet entered into operation will be destined to electro-intensive products.

For the purpose of analysis, the present monograph is divided into seven chapters. In chapter 1 information about chlorine is presented. Chapter 2 presents a literature review focusing on the fundamentals of electrolysis processes and their technologies.

In chapter 3 are questions related to the topologies of the industrial electrical system showing the electrical equipment used for the electrolysis process feeds. In chapter 4 the details of the electrical system of the electrolysis supply.

In chapter 5 are specifications of the electrolytic cells:

- Electrolytic cells using asbestos-type diaphragm technology using cathode model MDC-55;
- Electrolytic cells using PMX diaphragm technology (PTFE synthetic fiber + zirconium dioxide) using cathodes models MDC-55 and BP-66;
- Electrolytic cells using mercury technology;
- Electrolytic cells using membrane technology;

In chapter 6 the conclusions.

In chapter 7 the bibliographical references.

KEYWORDS: *electrolysis, electrolytic cells, electricity, rectifiers.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Equivalente eletroquímico (g/Ah).....	19
Tabela 5.1 – Medições das variáveis células eletrolíticas diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55.....	73
Tabela 5.2 – Medições das variáveis células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.....	76
Tabela 5.3 – Medições das variáveis células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.....	80
Tabela 5.4 - Consumos específicos dos tipos de células eletrolíticas diafragma.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Reações de eletrólise e energia livre de Gibbs.....	21
Figura 2.2 - Gráfico de condutividade x concentração de soda.....	24
Figura 2.3 - Desenho esquemático de uma célula mercúrio	26
Figura 2.4 - Desenho esquemático de uma célula diafragma	27
Figura 2.5 - Desenho esquemático de uma célula membrana.....	28
Figura 3.1 - Cubículos de média tensão de painel 14,5kV, 4000A, 31,5kA.....	30
Figura 3.2 - Compartimentos do cubículo de média tensão	32
Figura 3.3 - Disjuntor de média tensão	34
Figura 3.4 - Transformador retificador 18kA para eletrólise membrana	35
Figura 3.5 - Circuito em ponte trifásica, resultando em uma rede de 6 pulsos.....	36
Figura 3.6 - Circuito em dupla-ponte, resultando em uma rede de 12 pulsos.	36
Figura 3.7 - Circuito em dupla-estrela com reator de interfase, resultando em uma rede de 06 pulsos	37
Figura 3.8 - Dois circuitos em dupla-estrela com reator de interfase, resultando em uma rede de 12 pulsos.	37
Figura 3.9 - Terminais secundários e conexões do transformador retificador 37kA..	38
Figura 3.10 - Saída de barras do neutro da estrela do transformador retificador 37kA.	38
Figura 3.11 - Transformador retificador 75kA para eletrólise diafragma	39
Figura 3.12 - Transformador retificador 114kA para eletrólise mercúrio	39
Figura 3.13 - Conversor CA/CC tiristorizado 18kA para eletrólise membrana	40
Figura 3.14 - Conversor CA/CC tiristorizado 75kA para eletrólise diafragma.....	41
Figura 3.15 - Conversor CA/CC tiristorizado 114kA para eletrólise mercúrio.....	42
Figura 3.16 - Conversor de 6 pulsos isolado por transformador Δ/Y	43
Figura 3.17 - Conversor de 12 pulsos Δ/Y e $\Delta/\Delta-Y$	44

Figura 3.18 - Conversores de 12 pulsos $\Delta/Z-Z$ E $\Delta/P-P$	44
Figura 3.19 - Conversores de 18 pulsos $\Delta/Z-Y-Z$ E $\Delta/P-\Delta-P$	45
Figura 3.20 - Chave seccionadora fabricante Ferraz 40kA	48
Figura 3.21 – Barramento de corrente contínua para conexão com a eletrólise.	49
Figura 4.1 - Diagrama unifilar sistema elétrico membrana (parte 1).....	52
Figura 4.2 - Diagrama unifilar sistema elétrico membrana (parte 2).....	52
Figura 4.3 – Enrolamentos de alta tensão do transformador principal TAR-01	53
Figura 4.4 – Enrolamentos de média tensão do transformador principal TAR-01	54
Figura 4.5 – Enrolamentos terciário do transformador principal TAR-01	54
Figura 4.6 – Enrolamentos de alta tensão dos transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04	55
Figura 4.7 – Enrolamentos de baixa tensão dos transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04	56
Figura 4.8 – Dados de placa dos transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04	56
Figura 4.9 – Diagrama fasorial do transformador TR-01	57
Figura 4.10 – Diagrama fasorial do transformador TR-02	57
Figura 4.11 – Diagrama fasorial do transformador TR-03	58
Figura 4.12 – Diagrama fasorial do transformador TR-04	58
Figura 4.13 - Diagrama unifilar sistema elétrico diafragma (parte 1).....	60
Figura 4.14 - Diagrama unifilar sistema elétrico diafragma (parte 2).....	61
Figura 4.15 – Enrolamentos de alta tensão dos transformadores retificadores TR-05, TR-06, TR-07 e TR-08	63
Figura 4.16 – Enrolamentos de baixa tensão dos transformadores retificadores TR- 05 TR-06, TR-07 e TR-08	64
Figura 4.17 – Dados de placa dos transformadores retificadores TR-05, TR-06, TR- 07 e TR-08	64
Figura 4.18 - Diagrama unifilar sistema elétrico mercúrio (parte 1).....	66

Figura 4.19 - Diagrama unifilar sistema elétrico mercúrio (parte 2).....	67
Figura 5.1 - Consumo específico DC da célula diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55.....	73
Figura 5.2 – Consumo total de energia da célula diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55.	74
Figura 5.3 - Eficiência da célula diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55. ...	74
Figura 5.4 - Consumo específico DC da célula diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.....	77
Figura 5.5 - Consumo total de energia da célula diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.....	77
Figura 5.6 - Eficiência da célula diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.	78
Figura 5.7 - Consumo específico DC da célula diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.	80
Figura 5.8 - Consumo total de energia da célula diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.....	81
Figura 5.9 - Eficiência da célula diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.....	81
Figura 5.10 – Capacidade de produção Cl ₂ no ano de 2005 da sala de células diafragma (Amianto catodo MDC-55).....	83
Figura 5.11 – Capacidade de produção Cl ₂ no ano de 2005 da sala de células diafragma (PMX catodo MDC-55).	84
Figura 5.12 – Capacidade de produção Cl ₂ no ano de 2005 da sala de células diafragma (PMX catodo BP-66).....	84
Figura 5.13 – Consumo total de energia da célula eletrólitica diafragma no ano de 2005.	85
Figura 5.14 – Consumo total de energia da célula eletrólitica diafragma no ano de 2015.	85
Figura 5.15 – Consumo total de energia da célula eletrólitica diafragma no ano de 2020.	86

Figura 5.16 – Carga média em (kA) da sala de células mercúrio no ano de 2020....	86
Figura 5.17 – Tensão média por célula eletrolítica da sala de células mercúrio no ano de 2020.	87
Figura 5.18 - Eficiência da célula eletrolítica mercúrio no ano de 2020.	87
Figura 5.19 – Consumo total de energia da célula eletrolítica mercúrio no ano de 2020.	88
Figura 5.20 – Capacidade de produção Cl ₂ no ano de 2020 da sala de células mercúrio.	88
Figura 5.21 – Carga média em (kA) da sala de células mercúrio no ano de 2020	89
Figura 5.22 – Tensão média por célula eletrolítica da sala de células membrana no ano de 2020	89
Figura 5.23 – Eficiência da célula eletrolítica membrana no ano de 2020	90
Figura 5.24 – Consumo total de energia da célula eletrolítica membrana no ano de 2020	90
Figura 5.25 – Capacidade de produção Cl ₂ no ano de 2020 da sala de células membrana.	91

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Lei de Faraday	18
Equação 2.2 – Número de moles do material depositado	19
Equação 2.3 – Quantidade de produto convertido na eletrólise	20
Equação 2.4 – Eficiência de corrente	20
Equação 2.5 – Equação geral na eletrólise de cloreto de sódio	20
Equação 2.6 – Energia livre de Gibbs	22
Equação 2.7 – Tensão de decomposição do anodo	22
Equação 2.8 – Tensão de decomposição do catodo	22
Equação 2.9 – Tensão de composição da célula	22
Equação 2.10 – Atividade da célula	22
Equação 2.11 – Coeficiente de atividade	23
Equação 2.12 – Sobretensão do eletrólito	23

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	16
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Eletrólise	18
2.2 Leis de Faraday	18
2.3 Eficiência de corrente	20
2.4 Tensão elétrica da célula	21
2.5 Efeito temperatura	24
2.6 Células eletrolíticas	25
2.7 Célula de mercúrio	26
2.8 Célula de diafragma	27
2.9 Célula de membrana	28
3.SISTEMA ELÉTRICO	29
3.1 Introdução	29
3.2 Estrutura e periféricos do sistema elétrico	29
3.3 Painel de média tensão	30
3.4 Classificação quanto a isolação elétrica	30
3.5 Características construtivas dos painéis de média tensão	31
3.6 Disjuntor de média tensão	33
3.7 Disjuntor de média tensão à vácuo	33
3.8 Transformador retificador	35
3.9 Conversor CA/CC	40
3.10 Conversores de múltiplos pulsos isolados	42
3.11 Conversor de 6 pulsos	43
3.12 Conversor de 12 pulsos	43
3.13 Conversor de 18 pulsos	45
3.14 Sistema de controle	46
3.15 Equipamentos de corrente contínua	47

4.DETALHAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DAS ELETRÓLISES.....	51
4.1 Introdução.....	51
4.2 Sistema elétrico da eletrólise membrana.....	51
4.3 Sistema elétrico da eletrólise diafragma.....	60
4.4 Sistema elétrico da eletrólise mercúrio.....	66
5.CONSUMOS ENERGÉTICOS DAS ELETRÓLISES.....	71
5.1 Introdução.....	71
5.2 Consumo energético da sala de célula eletrolítica diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55.....	71
5.3 Consumo energético da sala de célula eletrolítica diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.....	75
5.4 Consumo energético da sala de célula eletrolítica diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.....	78
5.5 Capacidade de produção de cloro das células eletrolíticas diafragma	83
5.6 Consumo total de energia das células eletrolíticas diafragma.....	85
5.7 Consumo energético da célula eletrolítica mercúrio.....	86
5.8 Consumo energético da célula eletrolítica membrana.....	89
6.CONCLUSÕES.....	92
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

1.INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro e Derivados – ABICLOR o cloro é fundamental para o desenvolvimento humano e está muito presente no nosso dia a dia, sendo mais comum é associá-lo à água.

Devido ao seu poder bactericida, é usado no tratamento de água e no saneamento básico desde 1908, assegurando saúde e qualidade de vida. Pela sua propriedade desinfetante, também é utilizado em limpeza de piscinas. Os seus usos, porém, vão muito além disso. O cloro é usado na fabricação de milhares de produtos imprescindíveis às necessidades da sociedade contemporânea, ajudando a humanidade a se desenvolver de forma sustentável [2].

O cloro é produzido pela passagem de uma corrente elétrica através de uma solução de salmoura (sal comum dissolvido em água). Este processo é chamado de eletrólise. Os subprodutos gerados são a soda cáustica (hidróxido de sódio ou NaOH) e o hidrogênio (H₂). Para cada tonelada de cloro, são produzidas 1,1 toneladas de soda cáustica e 0,03% toneladas de hidrogênio [2].

No Brasil, a tecnologia mais utilizada pelo setor de cloro e soda é a de diafragma, que corresponde a 63% da capacidade instalada, sendo 9% diafragma sem asbestos e 54% com crisotila. Em seguida vem a tecnologia de membrana (23%) e a de mercúrio (14%) [2].

A soda cáustica (NaOH) e o cloro (Cl₂), constituem um dos pontos de partida, como matéria-prima básica, para a indústria química mundial. Mais de 50% das vendas químicas dependem, em alguma etapa do seu processo produtivo, da química do cloro [7].

A capacidade instalada do segmento cloro-soda, no Brasil, responde pelo equivalente a 3% da capacidade mundial instalada, situando-se na sexta posição do mundo, e, na América Latina, a indústria nacional é responsável por 55% do total. Em torno de 80% da produção é para uso cativo, principalmente para a fabricação de PVC, óxido de propeno e para uso das indústrias de celulose [10].

Pelos processos mais utilizados, modernamente, para produção de cloro, da soda e de outros produtos halogenados, são necessários basicamente três insumos: sal, água e energia elétrica. Algumas indústrias ainda utilizam o mercúrio metálico, embora esse processo venha sendo combatido por ser ambientalmente prejudicial, caindo aos poucos em desuso [13].

O processo de produção de cloro-soda se dá pela passagem de uma corrente elétrica pela salmoura (água + NaCl) onde, pela eletrolise, há a formação de cloro, soda cáustica e hidrogênio (H₂). A cadeia produtiva de cloro e da soda inicia-se com a eletrólise da salmoura, coproduzidos na proporção fixa de 1 tonelada de cloro e 1,13 tonelada de soda cáustica, e como parte da eletrólise produz hidrogênio, que é utilizado no próprio processo de produção ou comercializado [10].

Atualmente, três processos de eletrólise são utilizados industrialmente: o de mercúrio, o de diafragma e o de membrana. Em 2007, 72% da produção brasileira do setor de cloro-soda empregou a tecnologia de diafragma, 23% a de mercúrio e 5% a de membrana. Essa distribuição percentual é em função dos elevados custos inerentes à substituição a tecnologia que utiliza [2].

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eletrólise

A célula eletrolítica converte energia elétrica em energia química. A reação química não ocorre espontaneamente e sim quando aplicada em corrente elétrica externa. A finalidade desta aplicação pode ser, por exemplo, armazenamento de energia elétrica na forma de energia química, como nas baterias, ou também para decompor ou sintetizar novos produtos químicos, como a eletrólise do cloreto de sódio em solvente aquosa formando cloro, soda e hidrogênio [15,16].

O funcionamento de uma célula eletrolítica se baseia nas 1ª e 2ª leis de Faraday. A primeira lei estabelece que as quantidades de material liberadas no anodo e no catodo são diretamente proporcionais a quantidade de energia utilizada. A segunda lei define que, para uma mesma quantidade de energia elétrica, as quantidades de materiais liberados no anodo e catodo não proporcionais as massas equivalentes das substâncias formadas, sendo a massa equivalente definida como a massa dividida pela Valencia [18,19].

2.2 Leis de Faraday

Para que qualquer reação eletroquímica ocorra numa célula, os elétrons devem passar através de um circuito conectando os dois eletrodos. Por esta razão, a corrente I se torna uma medida conveniente da taxa de reação na célula enquanto a carga Q , que passa durante um período " t ", indica a quantidade total de reação que ocorreu. Na verdade, a carga necessária para a conversão de " m " moles de um material em produto, em uma reação com " n " elétrons (onde " n " é o número de cargas envolvidas na reação), é perfeitamente calculada usando-se a Lei de Faraday:

$$Q = \int Idt = mnF$$

2-1

onde $F = 96.500C$. O número de moles do material depositado é obtido pela razão entre o peso do material depositado, P , e seu peso atômico, A , ou seja:

$$m = \frac{P}{A}$$

O Faraday é, portanto, por definição, a carga necessária para se depositar um equivalente eletroquímico de um material, ou seja, $m/n = e$. O equivalente eletroquímico, e , é usualmente expresso em miligramas ou em gramas por Ampere por hora (g/Ah) como verificado na tabela abaixo. A quantidade de energia é, normalmente, medida em Ah e o Faraday é igual a 26,8 Ah [11].

Metal	Valência	Peso Atômico	Equivalente Eletroquímico (g/Ah)
Cromo	6	52,00	0,323
Cobre	1	63,54	2,372
Ferro	3	55,85	1,042
Chumbo	2	207,19	3,865
Níquel	2	58,71	1,095
Estanho	2	118,69	2,213
Zinco	2	65,38	1,220

Tabela 2.1 – Equivalente eletroquímico (g/Ah) [14].

2.3 Eficiência de corrente

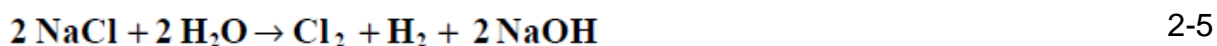
Esta variável está relacionada com a conversão eletroquímica, ou seja, a relação da quantidade de produto gerado e a quantidade de produto que se produz teoricamente considerando a massa molecular (M) da espécie química formada, a corrente elétrica (I) aplicada na célula, o número de elétrons (n) envolvidos na transferência entre anodo e catodo, a constante de Faraday (F) e o tempo da eletrólise (Θ). A quantidade de produto formado pode ser representada pela equação abaixo:

$$W = \frac{M}{nF} I\theta \quad 2-3$$

A constante de Faraday (F) estabelece a quantidade de energia elétrica para depositar 0,0011180 g de prata, que possui peso atômico de 107,880 g e Valência 1, ou seja, equivale a 96485,3 coulombs por equivalente. A eficiência de corrente é calculada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{W'}{W} \times 100 \quad 2-4$$

Em que W' é a quantidade de produto formado no processo. Os desvios de eficiência em relação a 100% estão associados a fatores químicos como a reações secundárias que podem ocorrer no processo. A reação geral da eletrolise da solução de salmoura é representada pela equação abaixo, formando hidróxido de sódio, cloro e hidrogênio.



Outras reações podem ocorrer, prejudicando a eficiência da eletrólise, tendo importância devido à influência que tem sobre o tempo de vida do anodo, tempo de vida do diafragma e a pureza dos produtos formados.

2.4 Tensão elétrica da célula

Segundo HINE (1985 apud JÚNIOR, 2006) considera a tensão elétrica geral da célula diafragma como sendo a somatória das tensões do potencial reversível dos eletrodos, da tensão de decomposição, das sobre potenciais do anodo e catodo, da queda de potenciais dos eletrólitos e do diafragma.

Potencial reversível anodo/catodo: é a tensão elétrica teórica requerida para suprir a força eletromotriz da célula eletroquímica, ou seja, é a diferença de potencial necessária para a ocorrência das reações no anodo e no catodo. O potencial reversível está associado à energia livre de Gibbs, diferença entre o potencial dos dois estados de um processo, que ocorre a pressão e temperatura constantes, indicando o quanto e em que direção o processo ocorre de modo espontâneo. Para o processo de eletrólise em diafragma, admitindo-se que as reações ocorrem à pressão e temperaturas constantes [25]. A figura 2.1 mostra o cálculo de energia livre de Gibbs.

	ΔG° , Kcal/mol
Anodo: $\text{Cl}^{-} = \frac{1}{2} \text{Cl}_2 + \text{e}^{-}$	31
Catodo: $\text{OH}^{-} + \frac{1}{2} \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{e}^{-}$	-19
Reação Geral: $\text{Cl}^{-} + \text{H}_2\text{O} = \frac{1}{2} \text{Cl}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2 + \text{OH}^{-}$	50

Figura 2.1 – Reações de eletrólise e energia livre de Gibbs [15].

O potencial reversível é dado pela equação:

$$-\Delta G = nFE_f \quad 2-6$$

Onde ΔG é a energia livre de Gibbs, E_f é a força eletromotriz para a reação eletroquímica em questão, n é o número de cargas transferidas e F , constante de Faraday. Para o anodo a tensão de decomposição é definida pela equação:

Para o anodo a tensão de decomposição é definida pela equação:

$$E_A = E_A^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{(p_{Cl_2})^{1/2}}{(a_{Cl^-})} \right] \quad 2-7$$

Para o catodo a tensão de decomposição é definida pela equação:

$$E_C = E_C^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{(p_{H_2})^{1/2}}{(a_{H_2O})} \right] \quad 2-8$$

Logo a tensão de decomposição E é definida pela equação:

$$E = E_A - E_C \quad 2-9$$

Onde E_A e E_C são os potenciais eletroquímicos da reação a 25°C, R é a constante dos gases, n é o número de elétrons transferidos para as reações da célula, F é a constante de Faraday, α é a atividade para íons cloro e água respectivamente.

A atividade pode ser calculada pelo produto da concentração molar C pelo coeficiente de atividade γ .

$$a_{H^+} = C_{H^+} \times \gamma_{\pm} \quad 2-10$$

Segundo PERRY (1950 apud JÚNIOR, 2006), o coeficiente de atividade tende a aumentar com o incremento da temperatura, e pode ser obtido pela equação:

$$\frac{2.3d \log \gamma_1}{dT} = -\frac{H'_1}{RT^2} \quad 2-11$$

Onde H' é a entalpia parcial molar do componente na solução menos a entalpia do líquido puro à mesma temperatura, T é a temperatura absoluta e R a constante dos gases. Desta forma observa-se que o potencial reversível de uma célula está associado com a temperatura, concentração e pressão.

Sobre potencial do anodo: Componente da tensão quando ocorre a formação de gás nos eletrodos. A resistência provocada pelo filme de gás sobre a superfície do eletrodo e pelo efeito das bolhas de gás que estão próximos ao anodo. A eletrólise do cloreto de sódio, o gás gerado no anodo é o cloro.

Sobre potencial do catodo: Ocorre o mesmo efeito já citado no anodo, mas o gás gerado é o hidrogênio.

Sobre potencial do eletrólito: Tensão necessária para superar as resistências do eletrólito, influenciada pela concentração e temperatura da solução e pelo efeito de formação de bolhas, e pode ser definida pela lei de Ohm:

$$IR = Id/Ak = id/k \quad 2-12$$

Onde I é a corrente elétrica, i é a densidade de corrente, d é o espaçamento dos eletrodos em cm, A área da seção transversal em cm^2 e k a condutividade em mhos/cm . Verifica-se que a condutividade da solução (k) sofre interferência da concentração e temperatura. Temperaturas mais elevadas, para uma mesma concentração, apresentam maiores condutividades, como por exemplo, para as soluções de NaOH. Entretanto, para uma mesma temperatura, pode ocorrer um incremento ou decréscimo da condutividade conforme a faixa de concentração em que se trabalha. A figura 2.2 abaixo mostra a variação de condutividade de soluções de NaOH e retratam o efeito da concentração e temperatura.

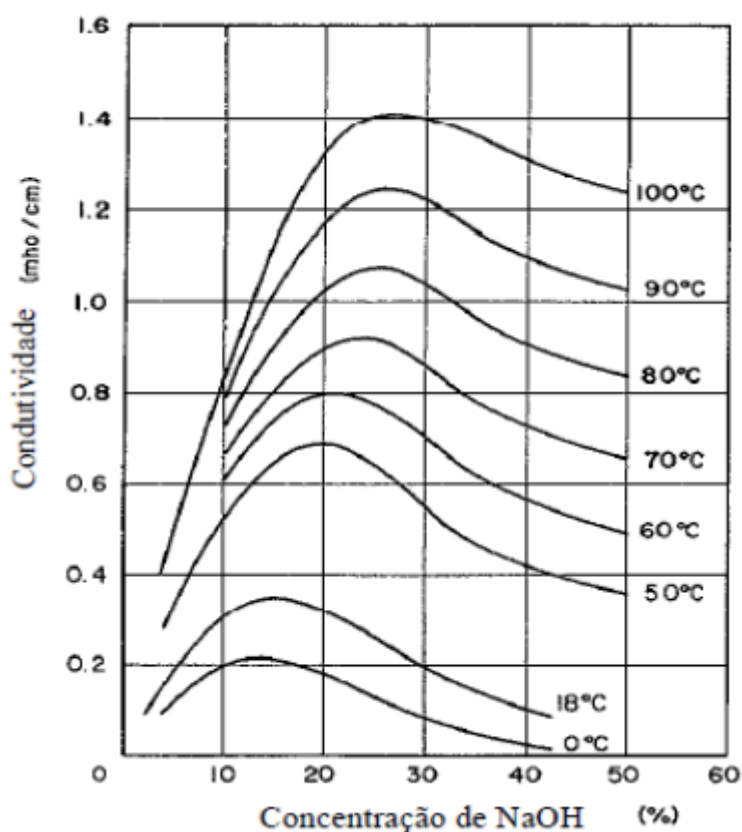


Figura 2.2 – Gráfico de condutividade x concentração de soda [15].

Outro fator que contribui para alteração da condutividade da solução ocorre quando nos eletrodos há produção de gás como cloro e hidrogênio. As bolhas de gás dissolvidas na solução podem incrementar fortemente a queda de potencial no ânodo e no cátodo.

A tensão da célula possui grande importância na indústria cloro-soda, pois qualquer diminuição de uma destas parcelas de tensão pode gerar redução no consumo de energia elétrica e conseqüentemente uma redução nos custos de produção.

2.5 Efeito Temperatura

Em geral, a resistência elétrica de uma substância varia com a temperatura. A resistência de substâncias não metálicas diminui com o aumento da temperatura e para todos os metais puros ocorre o inverso. Para intervalo de temperatura entre 0 e 100°C, a variação da resistência do metal é diretamente proporcional à temperatura.

Para a célula eletrolítica, constituída por materiais de tipos diferentes, o comportamento da resistência da célula em função da temperatura depende dos materiais utilizados em sua construção como também das características do processo, como composição, concentração do ânólito e do cátólito [19].

2.6 Células eletrolíticas

Célula eletrolítica é um sistema definido pelas paredes de um recipiente de forma adequada, totalmente ou parcialmente preenchido por um eletrólito, podendo estar dissolvido ou fundido. No eletrólito são imersos os condutores de elétrons que funcionam como eletrodos. É anódica a superfície de um eletrodo da qual a corrente elétrica de sinal positivo (inverso ao movimento dos elétrons) sai, penetrando no eletrólito, em um processo de troca eletrônica na interface do condutor de primeira classe (eletrodo) e do condutor de segunda classe (eletrólito), o que equivale a uma oxidação; portanto as espécies químicas se originam por perda de elétrons pelos reagentes para os condutores metálicos do circuito. Ao contrário, é catódica a superfície de um eletrodo na qual a corrente elétrica passa de um condutor de segunda classe ao de primeira classe, em um processo de redução, ou seja, pela aquisição por outras espécies químicas dos elétrons cedidos no processo anódico. A reação eletroquímica global é o resultado conjunto dos processos anódicos e catódicos.

Como consequência da circulação de corrente, o potencial do eletrodo em relação ao eletrólito adjacente (tensão galvânica) acusa uma variação (polarização) positiva na zona anódica e negativa na catódica. Esta forma de polarização, tendo as características de um fenômeno irreversível, desde que acompanhada de uma dissipação de energia, é também chamada de sobre tensão se, na prática, for atribuída a um único processo no eletrodo, nitidamente preponderante sobre qualquer outro processo eventualmente competitivo [14].

2.7 Célula de mercúrio

Na célula eletrolítica, o mercúrio líquido flui no fundo da célula, onde atua como catodo. Nessa mesma célula é bombeado a salmoura, que em contato com o mercúrio forma uma amálgama com sódio, que posteriormente é “arrastada” pelo fundo célula em direção a célula de decomposição. O anodo, que é onde o gás cloro é gerado, da célula eletrolítica fica submerso na salmoura e costuma ser de titânio recoberto com platina.

Na célula de composição, que é um grande vaso hermético, a amálgama flui continuamente onde se torna o anodo de uma nova oxi-redução, dessa vez com um catodo inerte de grafite.

O mercúrio gerado é recirculado para o início da célula eletrolítica. O hidrogênio gasoso é retirado pelo topo do vaso, onde passa por um tratamento para retirada de íons Hg^{+2} , geralmente esse tratamento é feito com peróxido de hidrogênio. A soda cáustica líquida 50% é retirada diretamente da célula de decomposição já em concentração de 50%, pronta para ser comercializada [2].

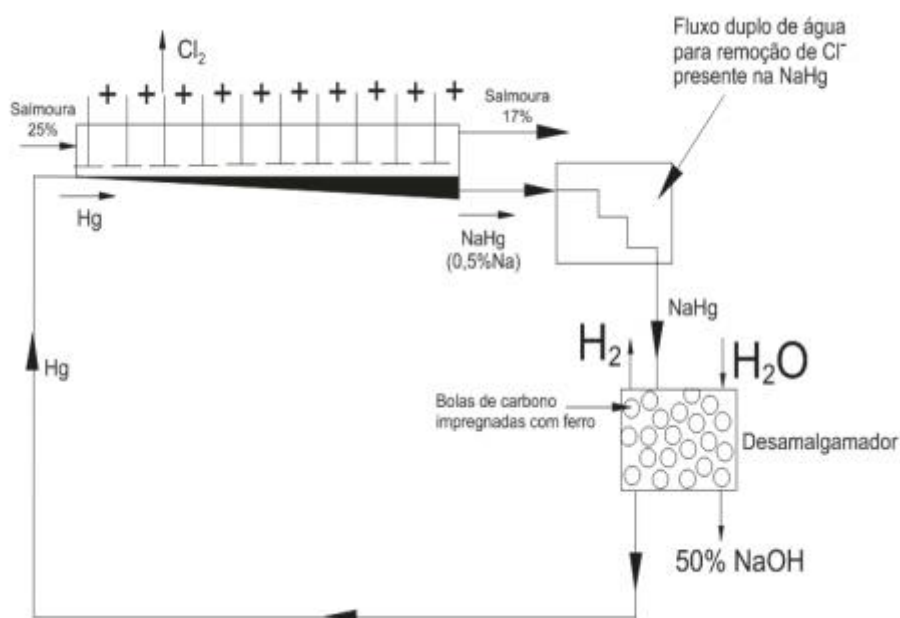


Figura 2.3 – Célula de amálgama de mercúrio e do circuito de recuperação do mercúrio [32].

2.8 Célula de diafragma

Neste processo, a célula é dividida em dois compartimentos: o anódico e o catódico. Eles são separados por uma tela metálica perfurada, impregnada a vácuo, com amianto crisotila. A salmoura entra no compartimento do anodo e percola através do diafragma em direção ao compartimento do catodo. Devido ao fluxo de eletrólitos entre os compartimentos não ser completamente controlado, a soda cáustica desse processo costuma ter concentrações baixas (cerca de 10%) [2].

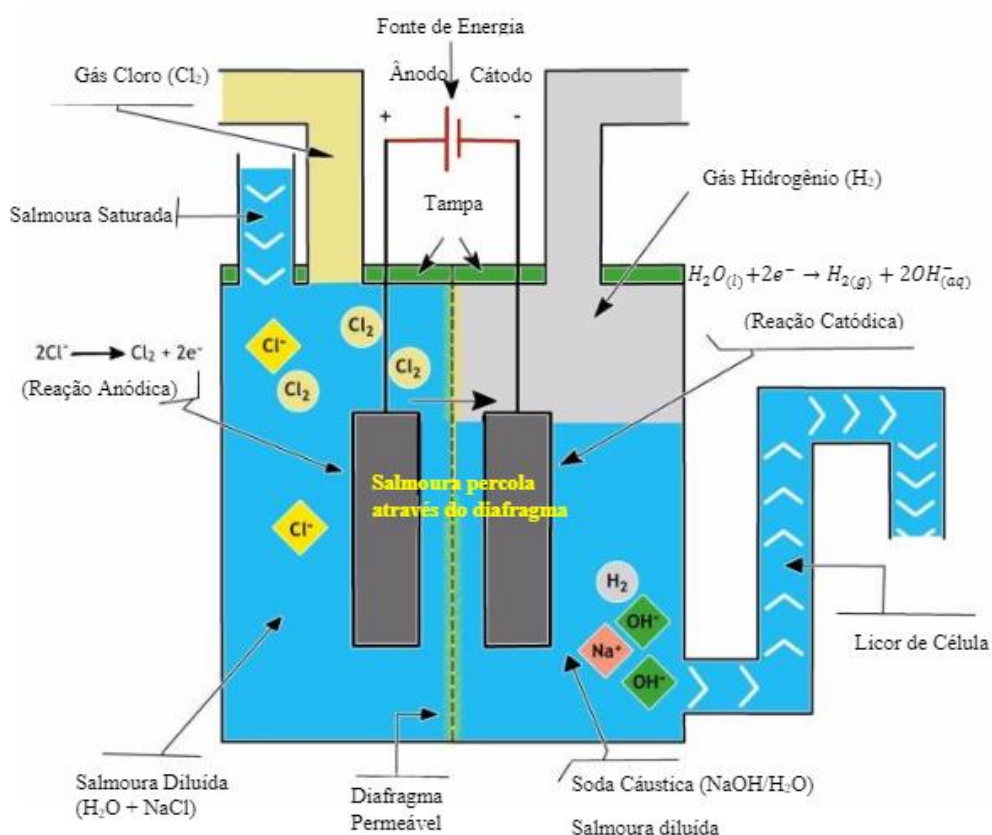


Figura 2.4 Desenho esquemático de uma célula diafragma [2].

A passagem de íons OH^- do catodo para o anodo ocasiona alguns problemas, como a formação de O_2 , que pode reagir com o anodo de grafite gerando entupimento na membrana. Além disso, o O_2 pode se oxidar preferencialmente ao Cl_2 , diminuindo a eficiência do processo. Para minimizar esses efeitos, adiciona-se HCl junto a salmoura alimentada para reagir com os íons hidroxila [2].

2.9 Célula de membrana

A evolução tecnológica do separador entre o compartimento catódico e anódico, levou ao surgimento da célula com impregando tecnologia membrana. Nesta tecnologia os dois compartimentos são mantidos separados por uma membrana íon seletiva, a qual impede a passagem de íons cloreto para o compartimento catódico, onde se forma a soda cáustica.

A salmoura diluída deixa o compartimento anódico e não se mistura a solução alcalina do lado catódico. A água é eletrolisada no cátodo, produzindo uma solução de soda cáustica entre 32-35% em massa. A concentração da solução e soda cáustica formada ainda é inferior à obtida nas células mercúrio, demandando que o excesso de água seja evaporado. O processo por tecnologia membrana é bastante semelhante ao por diafragma, todavia neste processo a membrana que separa o anodo do catodo permite apenas a passagem de íons Na^+ do anodo para o catodo, evitando a passagem de OH^- , por exemplo. Dá-se o nome a essa membrana de seletiva a cátions. O produto obtido é de alta pureza, porém os custos são bem mais elevados que se comparado ao processo com célula de diafragma [2].

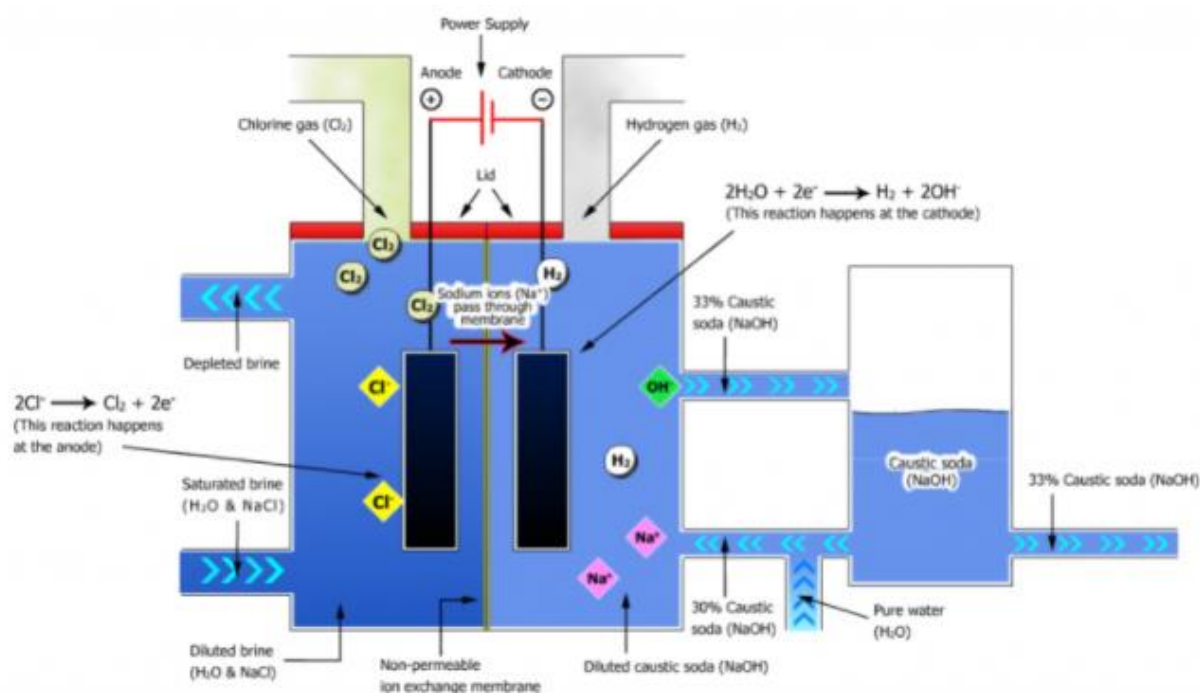


Figura 2.5 Desenho esquemático de uma célula membrana [2].

3.SISTEMA ELÉTRICO

3.1 Introdução

Inicialmente este capítulo tem a finalidade de descrever de forma abrangente os periféricos do sistema elétrico utilizados para fornecer a alimentação para as células eletrolíticas.

Na sequência serão apresentadas um panorama geral desses equipamentos, considerando as suas características técnicas, modelos e topologias, ressaltando aspectos fundamentais para sua adequada aplicação.

3.2 Estrutura e periféricos do sistema elétrico

- ⇒ Painel de média tensão e cubículos de distribuição;
- ⇒ Disjuntor de média tensão;
- ⇒ Transformadores-retificadores;
- ⇒ Conversores estáticos CA/CC;
- ⇒ Sistema de controle dos conversores estáticos CA/CC;
- ⇒ Equipamentos de corrente contínua;

3.3 Painel de média tensão

Um painel de média tensão é uma subestação blindada e abrigada, ou seja, um conjunto de equipamentos de manobra, proteção e medição conectados a um ou mais barramentos no interior de um invólucro metálico. O nível de tensão de sua aplicação vai depender especialmente dos dispositivos contidos em seu interior. Se a especificação da sua classe de tensão estiver compreendida entre 1 e 36,2 kV, o painel pode ser considerado de média tensão [9].

O painel de média tensão é responsável pelo direcionamento do fluxo energético, a fim de proporcionar a interligação dos circuitos de alimentação de cargas em um mesmo nível de tensão, permitindo o seccionamento dos circuitos, possibilitando a energização em trechos menores [17].



Figura 3.1 Cubículos de média tensão de painel 14,5kV, 4000A, 31,5kA – cortesia Unipar Carbocloro.

3.4 Classificação quanto a isolação elétrica

De acordo com a NBR IEC 60085 (2017), a isolação elétrica é feita através de materiais de baixa condutividade, ou seja, que impedem a livre movimentação elétrons, usados para separarem partes condutoras de diferentes potenciais elétricos em equipamentos [1]. Podem ser de natureza sólida, líquida ou gasosa.

Os painéis de média tensão pode possuir dois tipos de isolação:

Ar natural:

Nessa configuração, tanto os elementos de proteção e manobra quanto o barramento principal estão imersos no compartimento isolado a ar. Ocupam um espaço considerável no local de instalação. Por outro lado, são flexíveis, pois em geral utilizam disjuntores extraíveis, facilitando o processo em caso de manutenção ou retrofit.

Gás SF₆:

Nessa configuração, os elementos de proteção e manobra estão imersos no gás SF₆ e o barramento de alimentação pode estar ou não sob mesma condição. O SF₆ é utilizado por ser capaz de fornecer uma isolação elétrica 2,5 vezes maior do que o ar à pressão atmosférica e uma extinção eficaz do arco elétrico [1].

Esse tipo de painel é indicado para locais onde exista limitação de espaço, pois são mais compactos. Entretanto, podem ser menos flexíveis, uma vez que um problema detectado em um dos elementos de manobra ou proteção poderia acarretar na troca de uma coluna inteira, justamente pelo fato de haver possibilidade de vazamento do gás e, por conseguinte, de perda de isolação. Por isso, a manutenção ou retrofit de equipamentos individuais no interior do cubículo podem ser restritos neste aspecto [1].

3.5 Características construtivas dos painéis de média tensão

Conforme mencionado no item anterior, os painéis de média tensão, podem utilizar o hexafluoreto de enxofre (SF₆) ou ar como meio de isolação. Em relação a parte construtiva e operacional, os painéis de média tensão que utilizam os meios de isolação a SF₆ ou a ar, são bem semelhantes, por outro lado, no quesito manutenção, cada um possui vantagens e desvantagens. Os painéis de média tensão isolados a SF₆ são conhecidos por apresentar pouca ou nenhuma manutenção, sendo que em casos extremos, como na ocorrência de danos em eventual falta, a manutenção se torna mais complicada e dispendiosa, diferentemente dos painéis isolados a ar que necessitam de maiores manutenções [29,30].

Em geral, os painéis de média tensão tanto isolados a ar quanto os isolados a SF₆, são compostos de 4 compartimentos [30,31]:

- ⇒ Compartimento de manobra: Compartimento da instalação do equipamento de manobra, sendo esse um disjuntor, uma seccionadora, ou uma seccionadora fusível;
- ⇒ Compartimento do barramento: Compartimento da instalação do barramento principal e distribuição para os equipamentos de manobras;
- ⇒ Compartimento de conexão: Compartimento de instalação para conexões dos cabos de saída para alimentação das cargas.
- ⇒ Compartimento de baixa tensão: Compartimento onde serão instalados os equipamentos de controle e proteção dos cubículos;

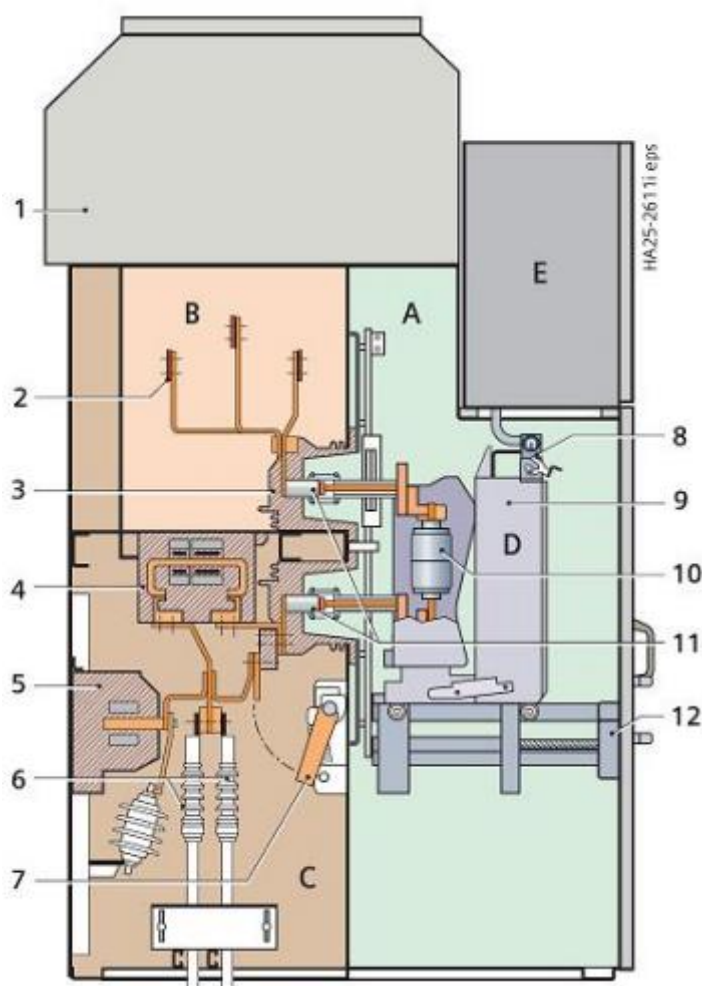


Figura 3.2 Compartimentos do cubículo de média tensão [23].

3.6 Disjuntor de média tensão

O disjuntor de média tensão tem a finalidade de interromper e reestabelecer o fluxo da corrente em um sistema elétrica em qualquer classe de tensão [20].

Ele funciona como uma chave, pode estar ligado (permite a passagem de corrente) ou desligado (impede a passagem de corrente) ainda, para interromper correntes de circuitos em plena carga ou a vazio, quando há necessidade de efetuar alguma manobra. A operação de qualquer disjuntor se faz com a separação de seus respectivos contatos que, quando fechados, permitem a passagem de corrente elétrica. Durante a separação dos contatos, o elevado campo elétrico que surge e a consequente ionização do meio entre os contatos, fazem com que seja presenciado o surgimento de arco elétrico. Como esse arco pode trazer sérios danos ao equipamento, ele deve ser eliminado o mais rápido possível [20].

Como princípio básico para a extinção de um arco elétrico, é preciso que se provoque o alongamento do mesmo por meios artificiais, reduza-se a temperatura e substitua-se o meio ionizado entre os contatos por um meio isolante [20].

3.7 Disjuntor de média tensão à vácuo

Este tipo de disjuntor utiliza a câmara de vácuo como elemento de extinção do arco. É constituído de três polos individuais instalados através de isoladores com suporte em epóxi na caixa de manobra. Cada polo apresenta uma câmara de extinção a vácuo apoiada em suas extremidades por isoladores cerâmicos, situada na parte central do polo. Os contatos fixo e móvel encontram-se dentro de cada câmara [20].



Figura 3.3 Disjuntor de média tensão – cortesia Unipar Carbocloro.

Os disjuntores a vácuo são especialmente utilizados em instalações em que a frequência de manobra é intensa. Por exemplo, são muito utilizados em circuitos de transformadores de fornos a arco, que podem apresentar 300 operações mensais, podendo realizar até dez mil manobras em corrente alternada ou permanecer dez anos em operação sem necessidade de inspeção. O disjuntor a vácuo não apresenta um meio de interrupção e isolante, ou seja, a câmara não contém material ionizável. Porém, quando ocorre a abertura dos contatos, tem-se a formação de um arco elétrico que é constituído exclusivamente pela fusão e vaporização do material dos contatos (gases que servem de meio de condução para o arco) [20].

O arco elétrico permanece até a corrente passar pelo zero natural. Neste instante, a redução brusca da densidade de carga transportada e a rápida condensação do vapor metálico, conduzem a um restabelecimento extremamente rápido das propriedades dielétricas no vácuo. Assim, a câmara a vácuo readquire a capacidade isolante e a capacidade de sustentar a tensão transitória de retorno, extinguindo o arco definitivamente. O vácuo apresenta elevada rigidez dielétrica mesmo com distâncias mínimas entre os contatos (entre 6 a 20 mm), assim, a interrupção do circuito pode ocorrer poucos milésimos de segundo antes da corrente passar pelo zero natural [20].

3.8 Transformador retificador

Transformadores retificadores geralmente são construídos empregando um ou mais enrolamentos. Em virtude da demanda e potência requerida podem ser projetados em seis ou doze pulsos, visando a redução dos níveis de harmônicos injetadas no sistema elétrico, impostas pelas cargas não lineares.

Todas as conexões entre o transformador e o conversor CA/CC devem ser as mais curtas possíveis com o objetivo de reduzir ao mínimo tanto as perdas ôhmicas quanto aquelas causadas pela circulação de correntes harmônicas fluindo no sistema elétrico [27].



Figura 3.4 Transformador retificador 18kA para eletrólise membrana – cortesia Unipar Carbocloro.

Seguem abaixo as topologias clássicas utilizadas nas alimentações de retificadores de alta potência para eletrólise:

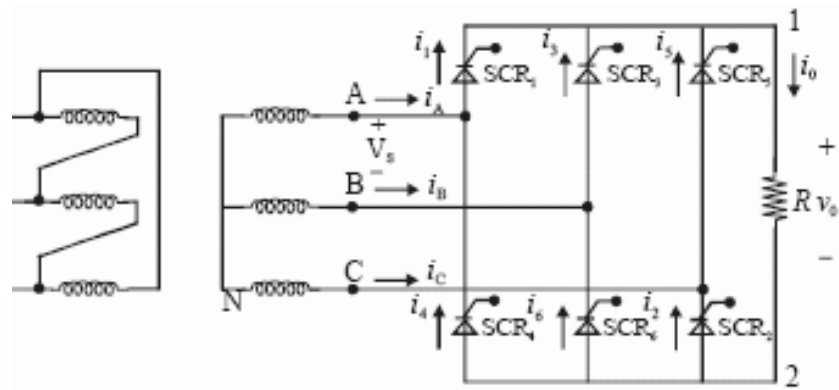


Figura 3.5 Circuito em ponte trifásica, resultando em uma rede de 6 pulsos [8].

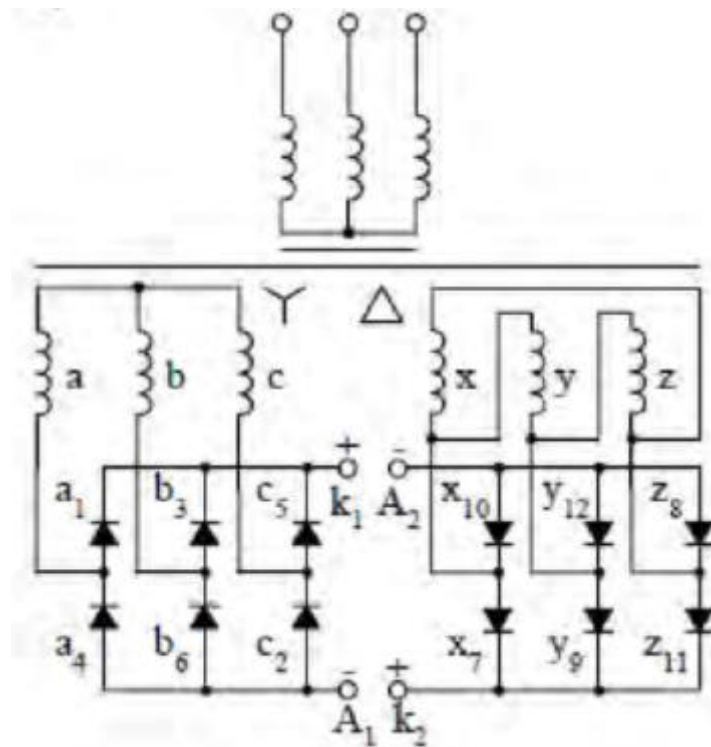


Figura 3.6 Circuito em dupla-ponte, resultando em uma rede de 12 pulsos [8].

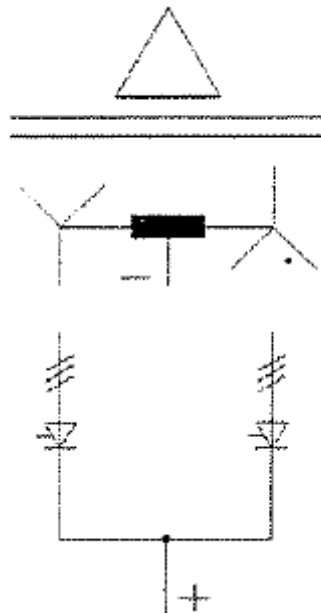


Figura 3.7 Circuito em dupla-estrela com reator de interfase, resultando em uma rede de 06 pulsos [8].

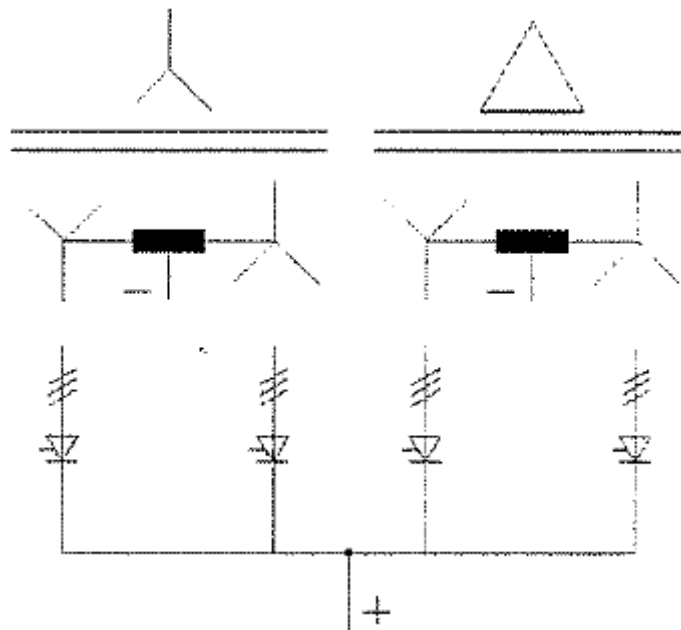


Figura 3.8 Dois circuitos em dupla-estrela com reator de interfase, resultando em uma rede de 12 pulsos [8].

Para reduzir ao máximo as perdas ôhmicas causadas pela circulação de correntes harmônicas que fluem no circuito, deve-se reduzir as conexões entre o transformador retificador ao conversor CA/CC [27].



Figura 3.9 Terminais secundários e conexões do transformador retificador 37kA – cortesia Unipar Carbochloro



Figura 3.10 Saída de barras do neutro da estrela do transformador retificador 37kA – cortesia Unipar Carbochloro

Os transformadores retificadores necessitam ser projetados e dimensionados para suportar as correntes harmônicas em seus enrolamentos, reduzindo ou até eliminando essas correntes [31].



Figura 3.11 Transformador retificador 75kA para eletrólise diafragma – cortesia Unipar Carbocloro.



Figura 3.12 Transformador retificador 114kA para eletrólise mercúrio – cortesia Unipar Carbocloro.

3.9 Conversor CA/CC

O conversor estático CA/CC é constituído a partir de unidades trifásicas básicas (retificador de $\frac{1}{2}$ onda). Sistemas de múltiplos pulsos são construídos pela associação em paralelo dos circuitos com deslocamento angular entre os primários dos transformadores. Para o adequado paralelismo dos elementos semicondutores de uma mesma fase é preciso garantir uma geometria conveniente e um apropriado tratamento da superfície tanto dos semicondutores quanto aos dissipadores. Os semicondutores são montados em unidades básicas compostas por dois dissipadores isolados nas quais os semicondutores são montados de um lado dos dissipadores e os fusíveis do outro. Todo diodo ou tiristor do circuito retificador possui um fusível em série. O objetivo deste elemento não é proteger o semicondutor, pois estes queimam antes por envelhecimento decorrente da formação de pontos quentes [23].



Figura 3.13 Conversor CA/CC tiristorizado 18kA para eletrólise membrana - cortesia Unipar Carbocloro.



Figura 3.14 Conversor CA/CC tiristorizado 75kA para eletrólise diafragma – cortesia Unipar Carbocloro.

A queima de um semicondutor geralmente o coloca em curto-circuito interno; portanto a função do fusível é proteger o equipamento no caso de um curto-circuito fase-fase, ou abrir o circuito no caso de um arco elétrico entre as bordas do dispositivo. O dimensionamento inadequado dos fusíveis é incapaz de prevenir um curto-circuito entre os barramentos de corrente contínua, o que pode provocar um arco elétrico de proporções catastróficas que dificilmente é extinto antes da perda completa do equipamento, pois os níveis de corrente chegam até a giga ampéres. Os fusíveis constituem ainda a maior limitação tecnológica para o aumento do nível de tensão CC em retificadores de alta potência; no mercado atual são disponíveis fusíveis para milhares de ampéres, mas para no máximo 1500V. A comutação dos dispositivos semicondutores, apesar de baixa frequência, envolve a manipulação de grandes quantidades de energia. Para evitar que a comutação provoque alguma falha por sobretensão são instalados junto a cada fase do conversor um circuito de ajuda a comutação (snubber) [8].



Figura 3.15 Conversor CA/CC tiristorizado 114kA para eletrólise mercúrio – cortesia Unipar Carbocloro.

Nos equipamentos comercialmente disponíveis o snubber RC é amplamente utilizado sem a necessidade de maiores sofisticações [28].

3.10 Conversores de múltiplos pulsos isolados

A aplicação de conversores de múltiplos pulsos surge como mais uma técnica de correção de fator de potência aplicada aos conversores CA-CC trifásicos. Esta técnica utiliza as características próprias de cada topologia em benefício da qualidade da corrente da rede, elevando o fator de potência; são técnicas estritamente passivas ou híbridas (ativas mais passivas) com uso de conversores estáticos que têm se destacado cada vez mais na recente literatura. Como é conhecido da literatura técnica, o espectro harmônico da corrente da rede de alimentação de retificadores trifásicos a diodos com filtro indutivo na saída é formado pela componente fundamental da corrente e pelas componentes harmônicas de ordens $k.n \pm 1$ ($p/ k=1,2,3\dots$) onde n é o número de pulsos. Considerando a carga

como uma fonte de corrente constante, observa-se que nos conversores de seis pulsos, todos os harmônicos pares de corrente e os múltiplos de três são eliminados naturalmente, devido à simetria da forma de onda. Desta forma, esta técnica utiliza conversores de seis pulsos ou associações destes para gerar conversores de múltiplos pulsos (12, 18 ou mais pulsos) para eliminar as componentes harmônicas de ordem inferiores e pares, que são as mais prejudiciais aos sistemas elétricos [8].

Conversores de múltiplos pulsos podem ser gerados a partir do agrupamento de conjuntos de conversores de seis pulsos defasados entre si. A defasagem dos conjuntos deve ser de $60^\circ / \text{número de conjuntos}$, sendo que o número de pulsos destes conversores é dado por seis vezes o número de conjuntos [23].

3.11 Conversor de 6 pulsos

O conversor de seis pulsos pode ser obtido pela conexão direta do retificador à rede trifásica de alimentação, porém este tipo de conexão não isola o conversor da rede. Para isolar o conversor, geralmente é empregado um transformador com conexão Δ/Y . Esta isolação também pode ser feita a partir das conexões Δ/Z (Δ/Z iguezague) e Δ/P (Δ/P olígono) [8].

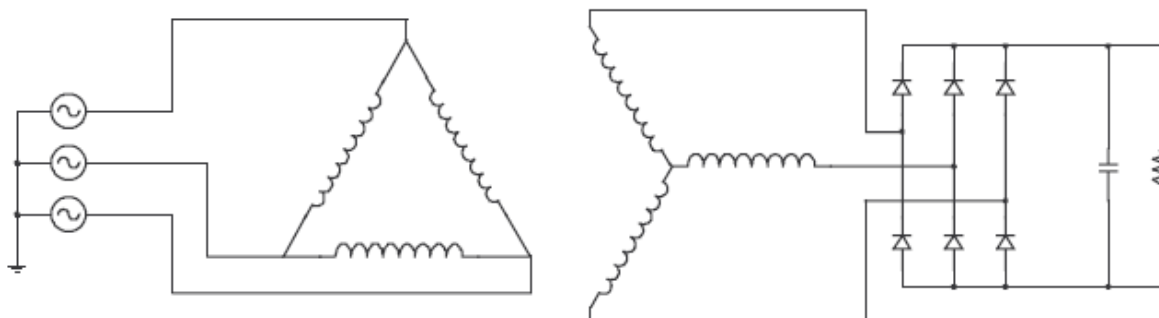


Figura 3.16 Conversor de 6 pulsos isolado por transformador Δ/Y [8].

3.12 Conversor de 12 pulsos

Os conversores de 12 pulsos apresentam apenas os harmônicos de ordens $k.12 \pm 1$ na corrente da rede, elevando o fator de potência ainda mais se comparado ao de seis pulsos. Obtemos um conversor de 12 pulsos a partir de dois conjuntos de seis pulsos, defasados entre si de 30° . A própria conexão Δ/Y defasa o sistema de

tensão em 30° ; porém, para a relação de espiras unitária, a tensão é modificada em raiz de três vezes. Assim, um conversor de 12 pulsos, sem isolamento, é obtido com uma das pontes ligada diretamente na rede e a outra, através de um transformador Δ/Y com relação unitária entre as tensões de linha. Para a topologia isolada, utiliza-se a conexão $\Delta/\Delta-Y$, ou seja, o primário é conectado em Δ , e um dos secundários que alimenta uma das pontes retificadoras é conectado em Δ , e o outro secundário, que alimenta a outra ponte, conectado em Y . É importante que as tensões de linha dos secundários tenham a mesma amplitude [8].

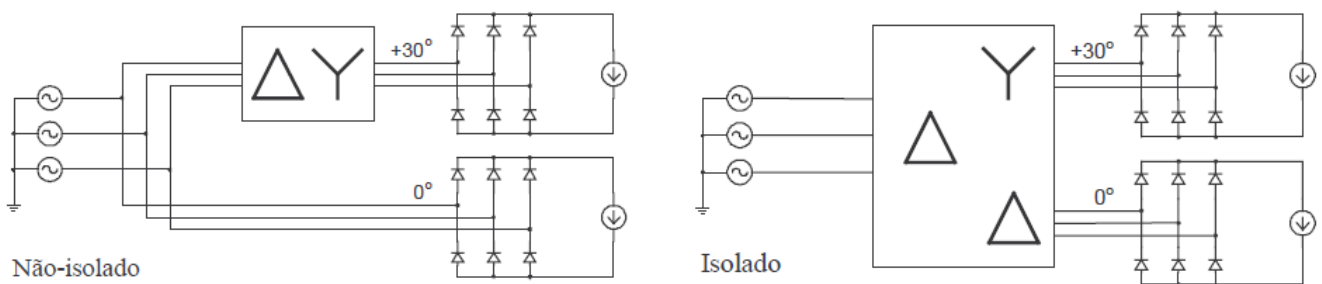


Figura 3.17 Conversor de 12 pulsos Δ/Y e $\Delta/\Delta-Y$ [8].

Outros conversores de 12 pulsos isolados podem também ser obtidos através das conexões $\Delta/Z-Z$ ou $\Delta/P-P$ ($P = \text{Polígono}$). Nestes dois casos, um dos secundários conectado em ziguezague (ou em polígono) é projetado para produzir um atraso da tensão de 15° em relação à rede. O outro secundário produz tensão adiantada de 15° em relação à rede. Desta forma, para ambos os conversores, os secundários apresentam defasagem de 30° entre si [23].

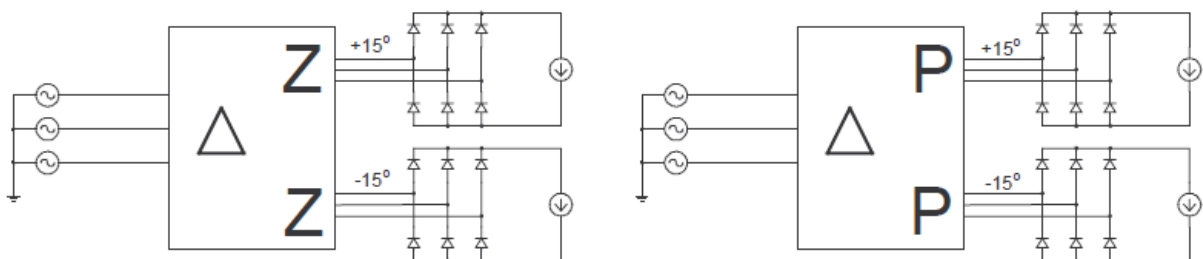


Figura 3.18 Conversores de 12 pulsos $\Delta/Z-Z$ e $\Delta/P-P$ [8].

3.13 Conversor de 18 pulsos

Um conversor de 18 pulsos apresenta apenas os componentes harmônicos de ordens $k.18 \pm 1$. Muitos conversores de 18 pulsos utilizam três pontes trifásicas de seis pulsos, análogos aos conversores de 12 pulsos. Neste caso, três sistemas de tensão trifásicos, defasados de 20° entre si, devem alimentar as pontes retificadoras. A conexão Δ/Z -Y-Z apresenta o secundário conectado em Y, adiantado de 30° , que é típico da conexão Δ/Y , e os dois secundários conectados em ziguezague, um é adiantado de 50° ($30^\circ + 20^\circ$) e o outro adiantado de 10° ($30^\circ - 20^\circ$), em relação ao primário. A conexão Δ/P - Δ -P apresenta um secundário conectado em Δ em fase com o primário e os outros dois, conectados em polígono, com ângulos de $+20^\circ$ e -20° em relação ao primário [8].

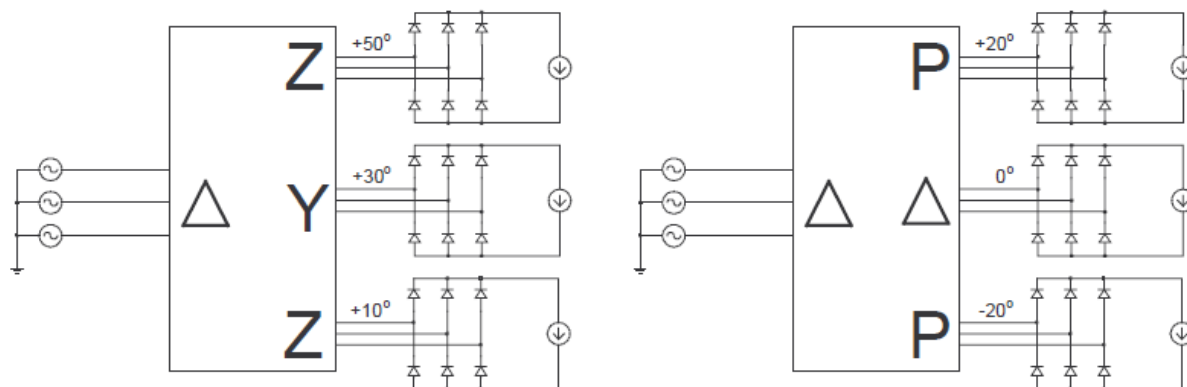


Figura 3.19 Conversores de 18 pulsos Δ/Z -Y-Z e Δ/P - Δ -P [8].

Apesar da grande robustez destes conversores e pelo isolamento galvânico entre a carga e a rede de alimentação, suas aplicações ficam prejudicadas pelo elevado peso e volume finais do conversor, visto que o transformador processa toda a potência da carga na frequência da tensão da rede. Para estes conversores a tensão retificada não é regulada, porém, este fato não é de significativa importância não se caracterizando como um problema [24].

Através do uso das conexões ziguezague e polígono é possível agrupar os conjuntos de conversores de seis pulsos das mais diversas formas. O conversor de

18 pulsos é gerado pelo agrupamento de três conversores de seis pulsos e se duas das conexões do secundário forem zigzague e/ou polígono, pode-se gerar um conversor de 18 pulsos com todas combinações possíveis de conexões (Δ/Z -Y-Z, Δ/Z - Δ -Z, Δ/Z -P-Z, Δ/P -Y-Z, etc.) porém, neste estudo, serão analisadas apenas as conexões mais usuais para os conversores de 6, 12 e 18 pulsos [23].

3.14 Sistema de controle

O processo de eletrólise requer uma regulação de corrente constante ao longo de sua operação. Em relação aos conversores CA/CC que utilizam tiristores, este controle é obtido através do ângulo de disparo dos tiristores e nos conversores CA/CC que utilizam diodos o controle é realizado através de reatores de núcleo saturado. Independentemente do sistema de controle o objetivo é ajustar e manter o valor da corrente desejado. A atuação do sistema de controle é baseada no monitoramento da tensão de alimentação e da corrente de saída. Nos retificadores a tiristores, existem duas unidades de controle: a unidade de monitoramento da tensão, responsável pelo sincronismo dos pulsos, e a unidade de regulação da corrente, responsável pelo ângulo de disparo. Ambas atuam sobre a unidade do controle de gate que comanda o disparo dos tiristores através dos módulos amplificadores de pulsos [24].

1. Fonte de alimentação ininterrupta
2. Set-point de corrente contínua
3. Regulador de corrente (grupo)
4. Unidade de monitoramento e sincronismo da tensão
5. Unidade de controle de gate
6. Módulo amplificador de pulso
7. Transformador para sinal do sincronismo da tensão
8. Medição da corrente contínua (parcial)

Depois de condicionados pela unidade de controle de gate, os pulsos são transmitidos por fibra óptica aos módulos amplificadores. Eles são construídos em placas de circuito impresso e instalados no interior do retificador [23].

Cada amplificador é capaz de disparar dois tiristores em paralelo. Para garantir o disparo apropriado, dois pulsos de alta potência são aplicados ao gate dos tiristores por transformadores de pulsos, responsáveis pelo isolamento galvânico entre o circuito de potência e o circuito de disparo. Se várias unidades operam em paralelo em uma planta de eletrólise, é usual a medição da corrente total e a inclusão de um regulador de corrente mestre. Este regulador compara a corrente total com os valores medidos nas unidades retificadoras, prevenido o desequilíbrio de corrente entre as unidades [12].

Recentemente, os sistemas de controle de retificadores de alta potência comerciais experimentaram grandes modificações para alcançarem alto desempenho de resposta. Atualmente possuem resolução de 16 bits, o que permite regulação de 0,1%, tal qual a exatidão da medição de corrente. O intervalo de tempo de atualização de todos os dados de medição também foi recentemente reduzido de 300ms para 30ms, ampliando a faixa de passagem do sistema [12].

Onde:

1. Fonte de alimentação ininterrupta
2. Set-point de corrente contínua
3. Regulador de corrente (total)
4. Unidades de monitoramento e sincronismo da tensão
5. Medição da corrente contínua (total)

3.15 Equipamentos de corrente contínua

Após os terminais de saída do retificador e antes das células eletrolíticas, fazem parte do sistema de retificação as chaves seccionadoras e os barramentos de corrente contínua. As chaves seccionadoras são instaladas no início dos barramentos conduzindo a corrente até a eletrólise. Somente são permitidas serem acionadas com o circuito sem fluxo de corrente tendo a finalidade de segregar o retificador da eletrólise. Este equipamento pode ser acionado de forma manual ou motorizada [3,26].

Os barramentos de corrente contínua são fabricados em cobre ou alumínio, sendo dimensionados seguindo os critérios:

- ⇒ Densidade de corrente;
- ⇒ Capacidade térmica;
- ⇒ Resistência mecânicas quanto ao curto-circuito;
- ⇒ Queda de tensão;



Figura 3.20 Chave seccionadora fabricante Ferraz 40kA – cortesia Unipar Carbocloro.

A densidade de corrente para a seção ótima das barras condutoras é calculada no ponto mínimo da curva da expressão matemática para o custo total do barramento, formada pelo custo inicial de aquisição mais o custo anual das perdas joulicas [5,6]. Na sequência são calculadas a capacidade térmica e queda de tensão para a seção padronizada mais próxima. Esta seção será adotada somente se satisfazer as condições impostas pelos critérios de capacidade térmica e queda de tensão. Caso contrário, outras soluções devem ser adotadas para se contornar a situação, como aumentar a seção das barras, ou pintá-las de preto [21].



Figura 3.21 Barramento de corrente contínua para conexão com a eletrólise - cortesia Unipar Carbochloro.

A capacidade térmica de um corpo é definida como a razão entre a quantidade de calor fornecida a ele e a variação em sua temperatura. Em barramentos de corrente contínua para sistemas de retificação para eletrólise ela deve ser verificada em condições de regime permanente e curto-circuito [4]. Em regime permanente é calculada a partir do calor gerado pelas perdas elétricas dissipadas pelo barramento por convecção e radiação, sendo obtida a partir da soma dessas duas parcelas. Em curto-circuito é avaliada a máxima elevação de temperatura até a atuação da proteção, assumindo que toda a corrente de curto circuito é utilizada para gerar calor. Portanto, a capacidade térmica impõe o limite máximo de condução de corrente cujas perdas joulicas podem ser dissipadas para o ambiente, limite além do qual o aumento da temperatura do barramento compromete a integridade do material no qual foi construído [22]. A queda de tensão é obtida através da Lei de Ohm em condições de corrente máxima, devendo ser inferior a 1%. A resistência mecânica é calculada através dos esforços a que as barras são submetidas em condições de curto-circuito. A distância máxima entre isoladores é determinada pelo cálculo do momento fletor resistente a força eletromagnética de

repulsão entre condutores de pólos opostos enquanto a distância entre separadores é obtida pela resistência à força de atração entre condutores de mesmo pólo [5,6].

4.DETALHAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DAS ELETRÓLISES

4.1 Introdução

Este capítulo visa descrever de forma detalhada as características técnicas dos equipamentos que compõe o sistema elétrico, com enfoque nos periféricos principais para a alimentação das eletrólises membrana, diafragma e mercúrio. Serão apresentados os diagramas unifilares separadamente por sistema elétrico.

4.2 Sistema elétrico da eletrólise membrana

A eletrólise membrana é constituída de 708 células eletrolíticas divididas em quatro circuitos elétricos com 177 células cada, esse conjunto de 177 células é chamado de eletrolisador, portanto os 04 eletrolisadores são alimentados pelos retificadores de potência (R-01, R-02, R-03 e R-04), acoplados aos transformadores retificadores (TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04).

Os filtros harmônicos passivos ressonantes em 3° ordem (L-01/C-01), 5° ordem (L-02/C-02), 7° ordem (L-03/C-03) e 11° ordem (L-04/C-04), estão conectados no painel de média tensão PMT-01 em 13,8kV, com a finalidade de reduzir os níveis de harmônicos nos retificadores e aumentar o fator de potência no barramento de 13,8kV.

Os transformadores retificadores, por sua vez, recebem as alimentações do painel de média tensão PMT-01 em 13,8kV, instalado na sala de comando da subestação SUB-01.

O transformador principal TAR-01 localizado na subestação SUB-01 é o responsável pela alimentação do painel de média tensão PMT-01.

Segue abaixo o diagrama unifilar do sistema elétrico da eletrólise membrana:

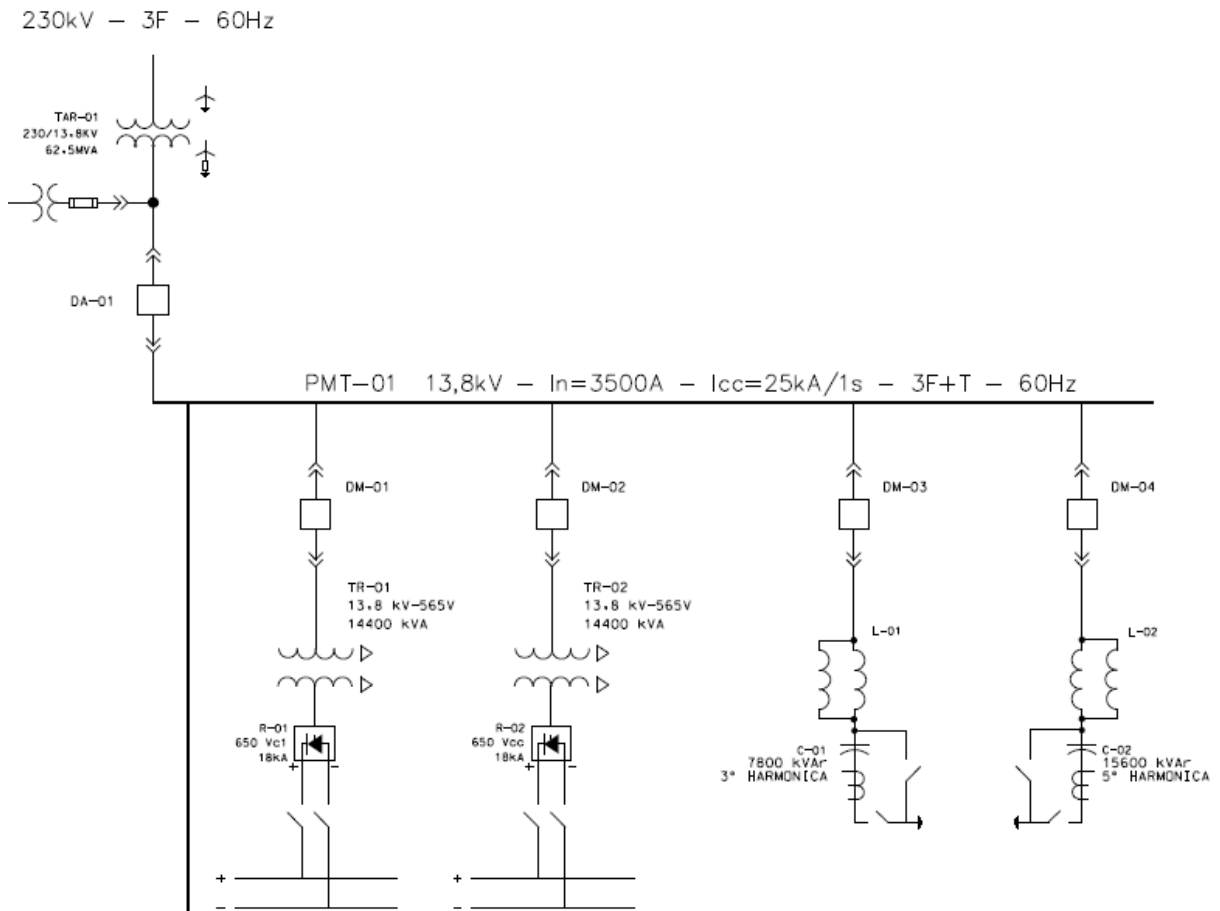


Figura 4.1 Diagrama unifilar sistema elétrico membrana (parte 1).

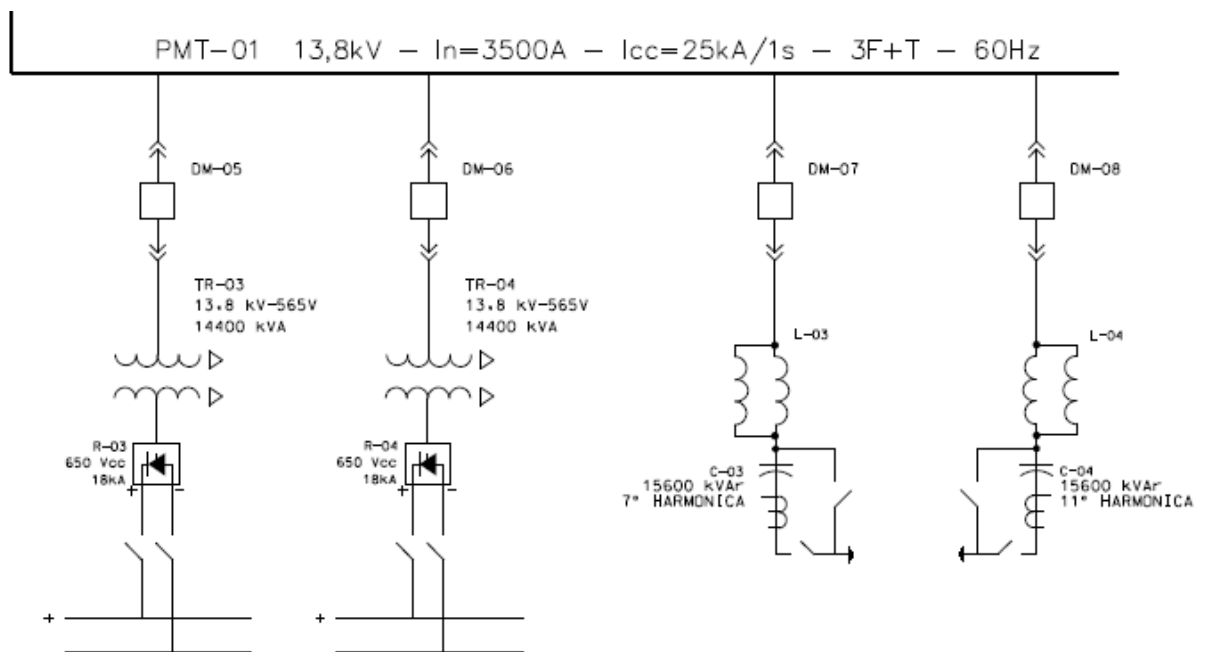


Figura 4.2 Diagrama unifilar sistema elétrico membrana (parte 2).

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas do transformador principal TAR-01:

- ⇒ **Transformador principal TAR-01:** Transformador de potência, trifásico, frequência: 60Hz, potência nominal: 62,5MVA (óleo natural, com a ventilação forçada), tensão primária: 230kV, tensão secundária: 13,8kV, tensão terciária: 6,9kV, impedância percentual à 85°C, 60Hz: 11,4%, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 950kV em H1-H2-H3, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 395kV, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 110kV em X1-X2-X3-X0-H0, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 34kV em X1-X2-X3-X0-H0, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 60kV em Y1-Y2, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 20kV em Y1-Y2,

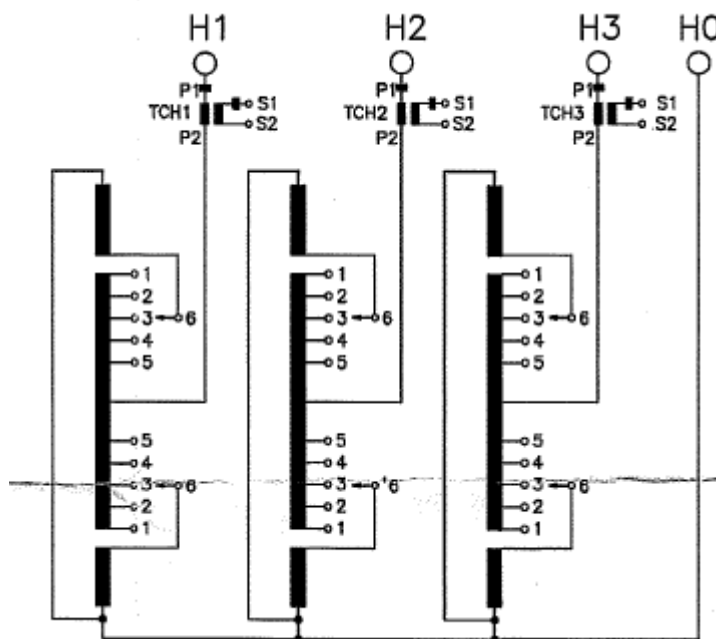


Figura 4.3 Enrolamentos de alta tensão do transformador principal TAR-01 – cortesia ABB.

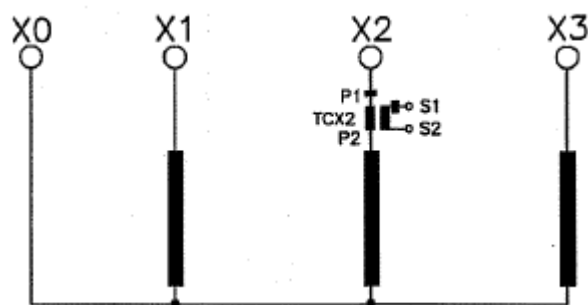


Figura 4.4 Enrolamentos de média tensão do transformador principal TAR-01 cortesia ABB.

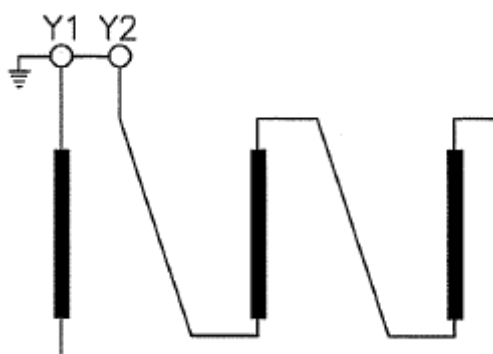


Figura 4.5 Enrolamentos terciário do transformador principal TAR-01 cortesia ABB.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas do painel de média tensão PMT-01:

- ⇒ **Painel de média tensão PMT-01:** Classe de tensão: 17,5kV; tensão de serviço: 13,8kV, frequência: 60Hz, tensão aplicada (1min): 38kV rms, NBI: 95kV , corrente térmica de curto-circuito: 25kA - 01seg, corrente dinâmica de curto-circuito: 63kAef (ASSIMÉTRICO), Corrente de resistência ao arco interno: 31,5kA - 01seg, corrente do barramento principal: 3500A.
- ⇒ **Cubículos de média tensão constituídos de:** Disjuntor à vácuo, 17,5kV, 2000A, composto de motor para carregamento de molas, 02 bobinas de abertura, bobina de fechamento, bobina de bloqueio do carro de extração, contador de manobras, contatos auxiliares (5NF+5NA), contatos de sinalização de posição do carro, dispositivo de bloqueio para a inserção, contatos auxiliares adicionais (3NF+2NA);

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos transformadores retificador TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04:

⇒ **Transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04:**

Transformador retificador, trifásico, frequência: 60Hz, potência nominal: 14,42MVA (óleo natural, com a ventilação forçada), tensão primária: 13,8kV, tensão secundária: 566,5V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 7,66%, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 110kV em H1-H2-H3, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 34kV, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 10kV em +U/-V, +V/-W, +W/-U

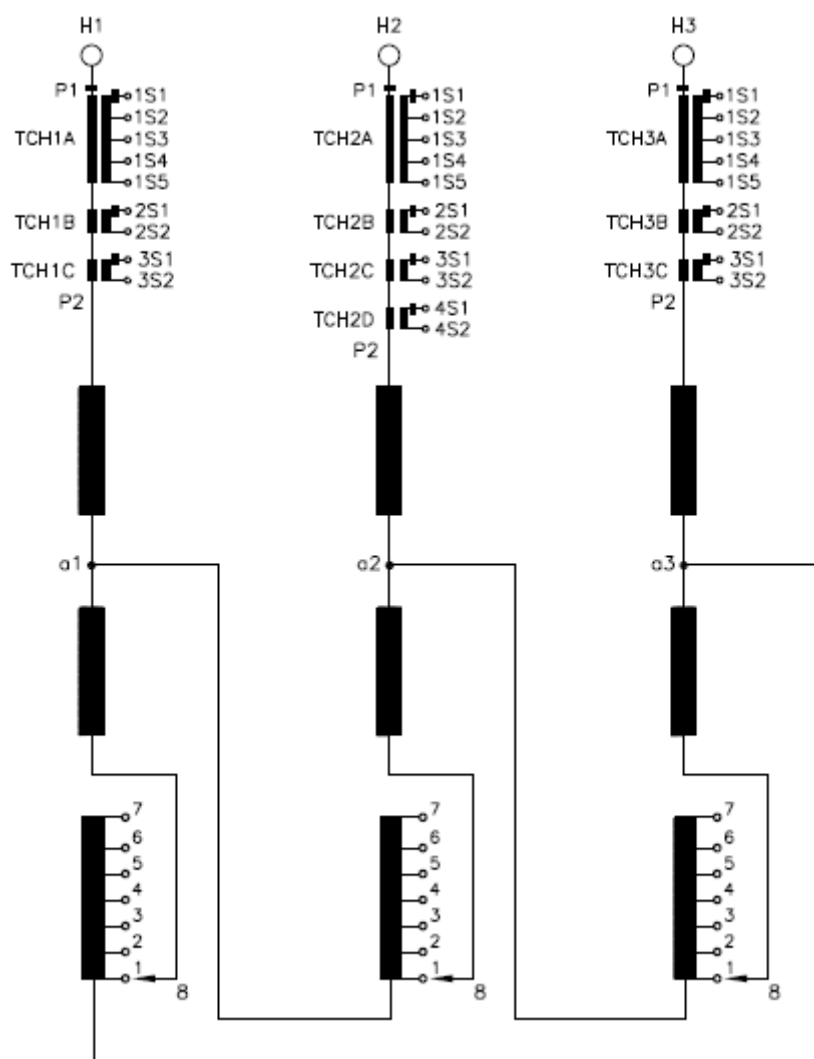


Figura 4.6 Enrolamentos de alta tensão dos transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04 cortesia ABB.

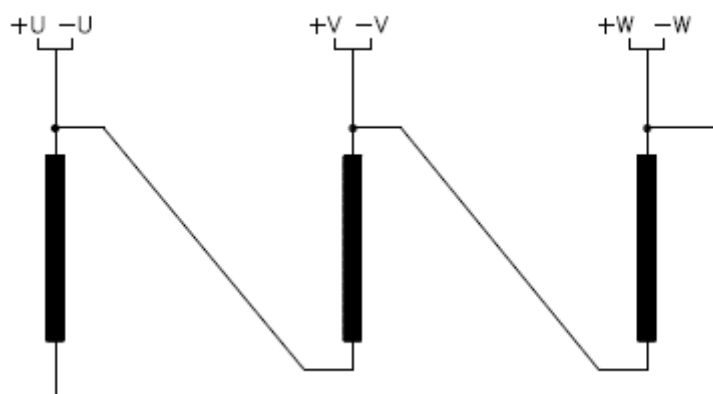


Figura 4.7 Enrolamentos de baixa tensão dos transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04 cortesia ABB

COMUTADOR DE DERIVAÇÕES SEM CARGA		TERMINAIS DE AT		
		H1-H2-H3		
POSIÇÃO	LIGAÇÃO	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (MVA)
1	1-8	13800	603,4	14,42
2	2-8		584,3	13,97
3	3-8		566,3	13,54
4	4-8		549,4	13,13
5	5-8		533,5	12,75
6	6-8		518,5	12,39
7	7-8		504,3	12,05

COMUTADOR DE DERIVAÇÕES SEM CARGA		TERMINAIS DE BT		
		+U,-U / +V,-V / +W,-W		
POSIÇÃO	LIGAÇÃO	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (MVA)
1	1-8	566,5	14700	14,42
2	2-8	548,5		13,97
3	3-8	531,6		13,54
4	4-8	515,8		13,13
5	5-8	500,8		12,75
6	6-8	486,7		12,39
7	7-8	473,4		12,05

TRANSFORMADORES DE CORRENTE (INTERNO)				
TC	TERMINAIS	RELAÇÃO	CLASSE	APLICAÇÃO
H1A/H2A/H3A	1S1-1S5	800-5A	10B200	PROTEÇÃO
	1S1-1S4	600-5A		
	1S1-1S3	400-5A		
	1S1-1S2	100-5A		
H1B/H2B/H3B	2S1-2S2	800-5A	0,3C25	MEDIÇÃO
H1C/H2C/H3C	3S1-3S2	800-5A	0,3C25	MEDIÇÃO
H2D	4S1-4S2	905-2,5A	3C25	IMAGEM TÉRMICA

TRANSFORMADORES DE CORRENTE (EXTERNO)				
TC	TERMINAIS	RELAÇÃO	CLASSE	APLICAÇÃO
---	S1-S2	200-5A	10B200	PROT.DE FUGA (TANQUE)

Figura 4.8 Dados de placa dos transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04 cortesia ABB.

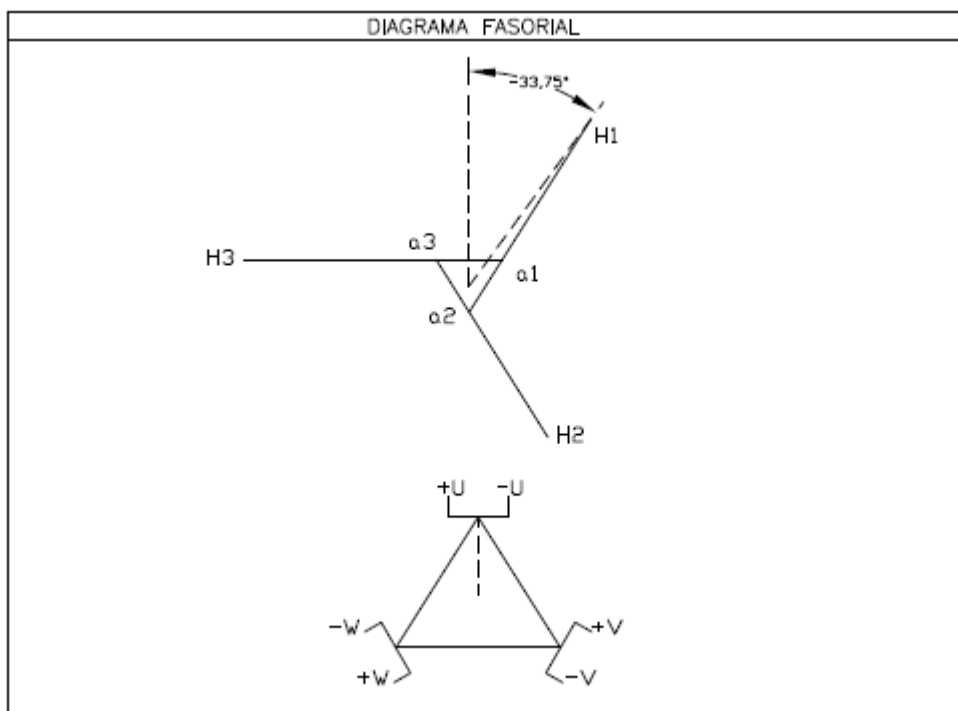


Figura 4.9 Diagrama fasorial do transformador TR-01 cortesia ABB.

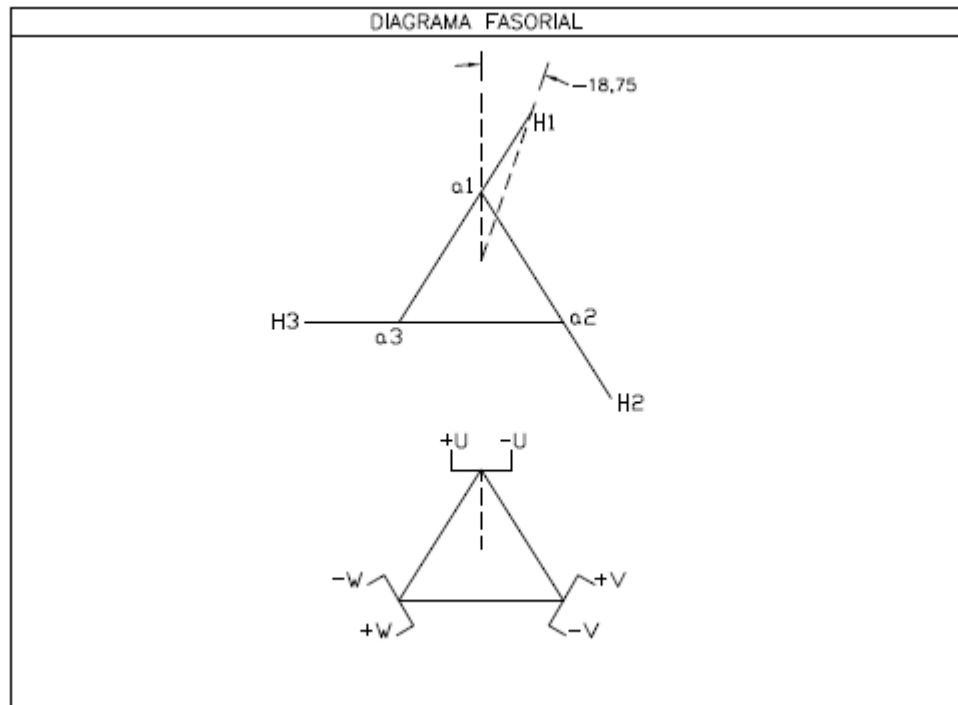


Figura 4.10 Diagrama fasorial do transformador TR-02 cortesia ABB.

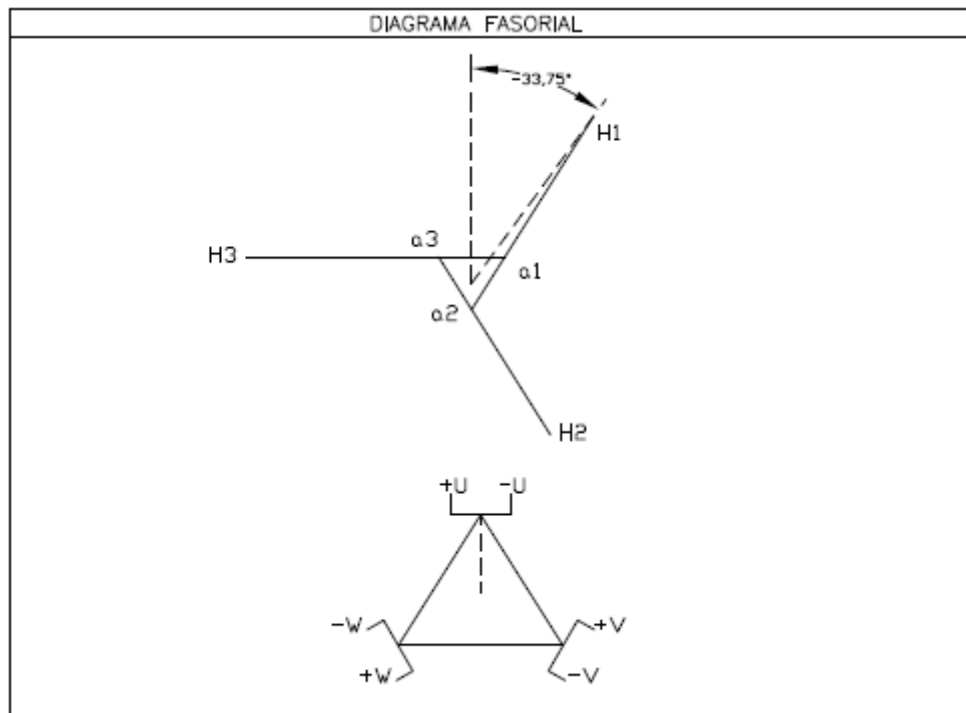


Figura 4.11 Diagrama fasorial do transformador TR-03 cortesia ABB.

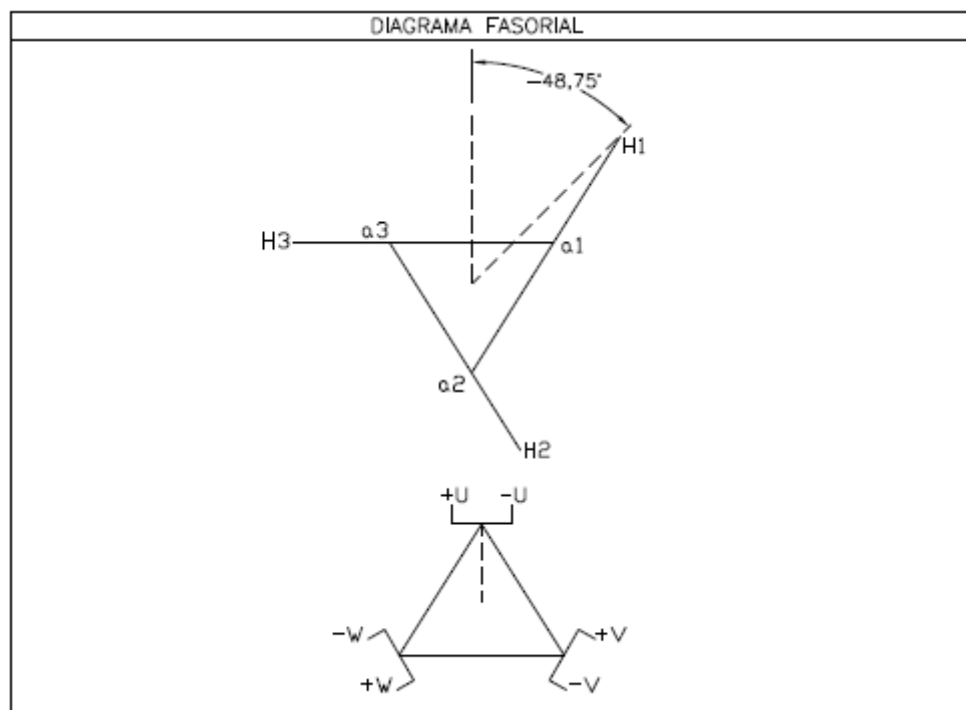


Figura 4.12 Diagrama fasorial do transformador TR-04 cortesia ABB.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos retificadores de potência R-01, R-02, R-03 e R-04:

- ⇒ **Retificadores de potência R-01, R-02, R-03 e R-04:** Retificador de potência tiristorizado, conectados em paralelo, dupla tipo de conexão: dupla ponte trifásica (DB) em 6 pulsos, tensão primária: 13,8kV /- 5%, tensão secundária: 565V (sem carga), frequência: 60Hz (+/- 1,5Hz), capacidade de curto-circuito trifásico: 400MVA, sistema de aterramento do neutro: aterrado por resistor 400A, 10 segundos, (13,8kV), tensão nominal contínua: 650Vdc, corrente nominal contínua total: 4x18kA, corrente nominal contínua por retificador: 18kA,

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos eletrolisadores da sala de eletrólise membrana:

Toda célula de tecnologia membrana para produção de cloro e soda possui 3 partes essenciais:

- ⇒ Anodo: meia concha de titânio pintada com uma tinta à base de metais nobres com área de 2,72 m², formando o compartimento anódico;
- ⇒ Catodo: meia concha de níquel pintada com uma tinta à base de níquel, formando o compartimento catódico;
- ⇒ Membrana: Polímero com propriedades iônicas, impede a passagem de cloretos para o compartimento catódico e de hidroxilas para o compartimento catódico.
- ⇒ No compartimento anódico é alimentado salmoura concentrada e é produzido gás cloro, íons de sódio e água atravessam a membrana e no compartimento catódico é produzido gás hidrogênio e soda caustica. Devido a íon-seletividade da membrana, a soda cáustica é praticamente isenta de cloretos.

4.3 Sistema elétrico da eletrólise diafragma

A eletrólise diafragma é constituída de 92 células eletrolíticas divididas em 02 circuitos elétricos com 46 células cada, portanto os 02 circuitos elétricos são alimentados pelos retificadores de potência (R-05, R-06, R-07 e R-08), acoplados aos transformadores retificadores (TR-05, TR-06, TR-07 e TR-08).

Os filtros harmônicos passivos ressonantes em 5° ordem (L-05/C-05), 7° ordem (L-06/C-06), 5° ordem (L-07/C-07) e 7° ordem (L-08/C-08), estão conectados no painel de média tensão PMT-02 em 14,5kV, com a finalidade de reduzir os níveis de harmônicos nos retificadores e aumentar o fator de potência no barramento de 14,5kV. Os retificadores de potência R-05 e R-06, operam na topologia paralelo, assim como os retificadores R-07 e R-08, constituindo os 02 circuitos elétricos.

Os transformadores retificadores, por sua vez, recebem as alimentações do painel de média tensão PMT-02 em 14,5kV, instalado na sala de comando da subestação SUB-02. Os transformadores principais TAR-02 e TAR-03, localizado na subestação SUB-02 são os responsáveis pelas alimentações do painel de média tensão PMT-02.

Segue abaixo o diagrama unifilar do sistema elétrico da eletrólise diafragma:

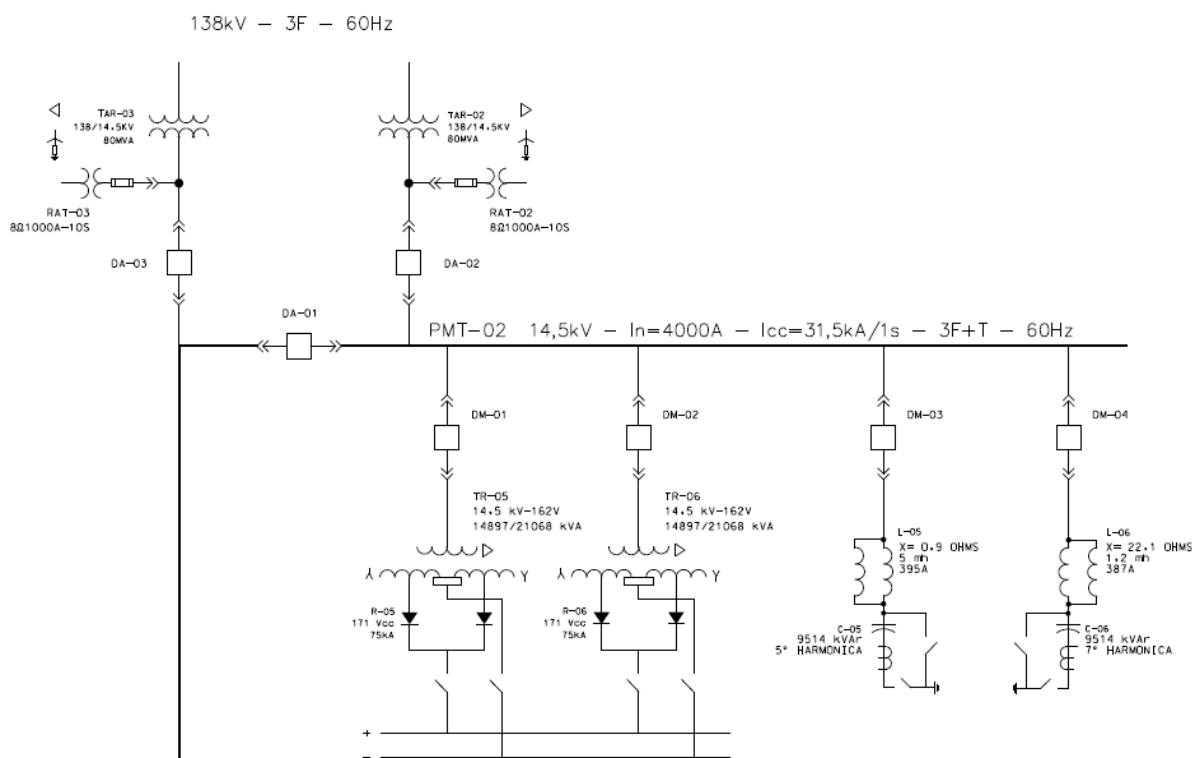


Figura 4.13 Diagrama unifilar sistema elétrico diafragma (parte 1).

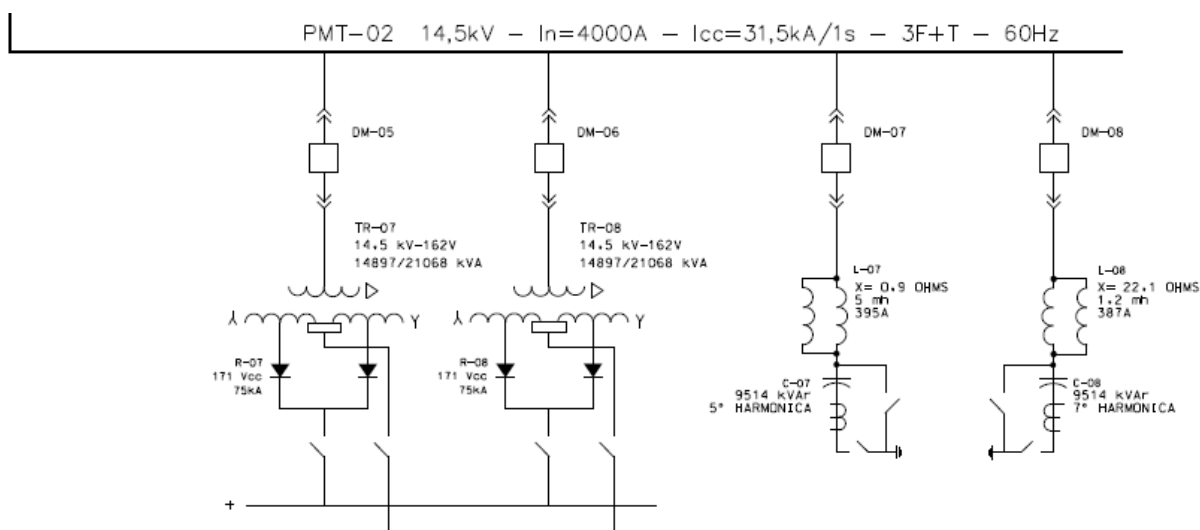


Figura 4.14 Diagrama unifilar sistema elétrico diafragma (parte 2).

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos transformadores principais TAR-02, TAR-03:

- ⇒ **Transformadores principais TAR-02 e TAR-03:** Transformador de potência, trifásico, frequência: 60Hz, potência nominal: 80MVA (óleo natural, com a ventilação forçada), tensão primária: 138kV, tensão secundária: 14,5kV, impedância percentual à 85°C, 60Hz: 20,54%, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 650kV em H1-H2-H3, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 275kV, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 110kV em X1-X2-X3-X0, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 34kV em X1-X2-X3-X0.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas do painel de média tensão PMT-02:

- ⇒ **Painel de média tensão PMT-02:** Classe de tensão: 17,5kV; tensão de serviço: 14,5kV, frequência: 60Hz, tensão aplicada (1min): 38kV rms, NBI: 95kV, corrente térmica de curto-circuito: 31,5kA - 01seg, corrente dinâmica de curto-circuito: 80kAef (ASSIMÉTRICO), Corrente de resistência ao arco interno: 31,5kA - 01seg, corrente do barramento principal: 4000A.
- ⇒ **Cubículos de média tensão constituídos de:** Disjuntor à vácuo, 17,5kV, 1250A/2000A/4000A, composto de motor para carregamento de molas, 02

bobinas de abertura, bobina de fechamento, bobina de bloqueio do carro de extração, contador de manobras, contatos auxiliares (5NF+5NA), contatos de sinalização de posição do carro, dispositivo de bloqueio para a inserção, contatos auxiliares adicionais (3NF+2NA);

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos transformadores retificador TR-05, TR-06, TR-07 e TR-08:

- ⇒ **Transformador retificador TR-05:** Transformador retificador, primário: trifásico, secundário: hexafásico, potência enrolamento primário: 1x14,89MVA, potência enrolamento secundário: 2x21,06MVA, potência bobinas de absorção: 2x8,62MVA, ligação primária: delta estendido, ligação secundária: 1xdupla estrela, frequência: 60Hz, tensão primária: 14,5kV, tensão secundária: 171V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 7,44%, deslocamento angular: +22,5°, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 150kV em H1-H2-H3, impulso atmosférico (kV de crista): 50kV em U, V, W, U1, V2, W3, N01, N02, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 50kV em U, V, W, U1, V2, W3, N01, N02.
- ⇒ **Transformador retificador TR-06:** Transformador retificador, primário: trifásico, secundário: hexafásico, potência enrolamento primário: 1x14,89MVA, potência enrolamento secundário: 2x21,06MVA, potência bobinas de absorção: 2x8,62MVA, ligação primária: delta estendido, ligação secundária: 1xdupla estrela, frequência: 60Hz, tensão primária: 14,5kV, tensão secundária: 171V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 7,39%, deslocamento angular: -22,5°, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 150kV em H1-H2-H3, impulso atmosférico (kV de crista): 50kV em U, V, W, U1, V2, W3, N01, N02, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 50kV em U, V, W, U1, V2, W3, N01, N02.
- ⇒ **Transformador retificador TR-07:** Transformador retificador, primário: trifásico, secundário: hexafásico, potência enrolamento primário: 1x14,89MVA, potência enrolamento secundário: 2x21,06MVA, potência bobinas de absorção: 2x8,62MVA, ligação primária: delta estendido, ligação

secundária: 1xdupla estrela, frequência: 60Hz, tensão primária: 14,5kV, tensão secundária: 171V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 7,36%, deslocamento angular: -7,5°, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 150kV em H1-H2-H3, impulso atmosférico (kV de crista): 50kV em U, V, W, U1, V2, W3, N01, N02, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 50kV em U, V, W, U1, V2, W3, N01, N02.

⇒ **Transformador retificador TR-08:** Transformador retificador, primário: trifásico, secundário: hexafásico, potência enrolamento primário: 1x14,89MVA, potência enrolamento secundário: 2x21,06MVA, potência bobinas de absorção: 2x8,62MVA, ligação primária: delta estendido, ligação secundária: 1xdupla estrela, frequência: 60Hz, tensão primária: 14,5kV, tensão secundária: 171V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 7,64%, deslocamento angular: +7,5°, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 150kV em H1-H2-H3, impulso atmosférico (kV de crista): 50kV em U, V, W, U1, V2, W3, N01, N02, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 50kV em U, V, W, U1, V1, W1, N01, N02.

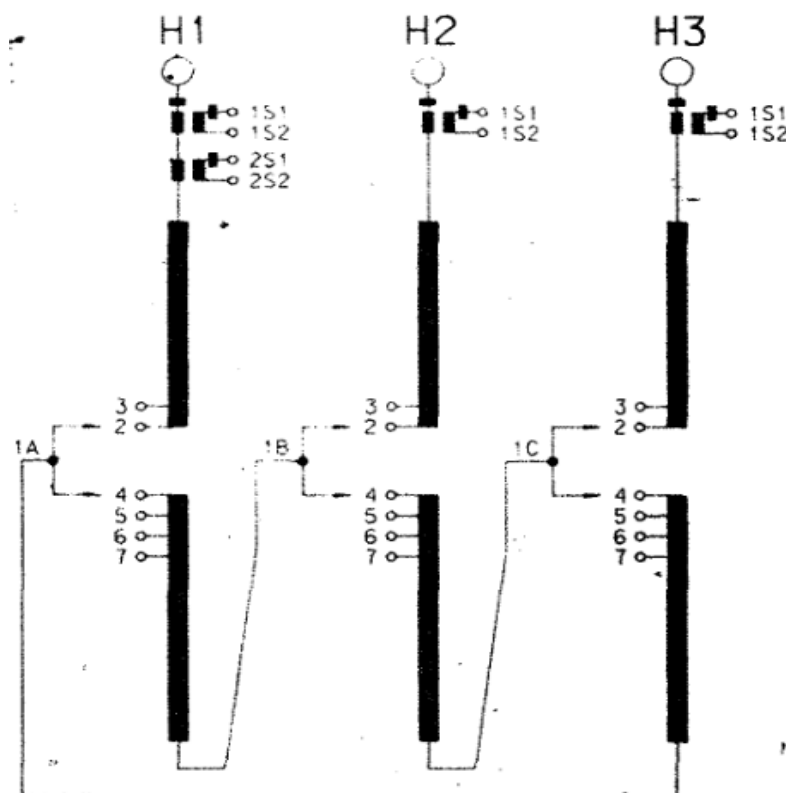


Figura 4.15 Enrolamentos de alta tensão dos transformadores retificadores TR-05, TR-06, TR-07 e TR-08 - cortesia ABB.

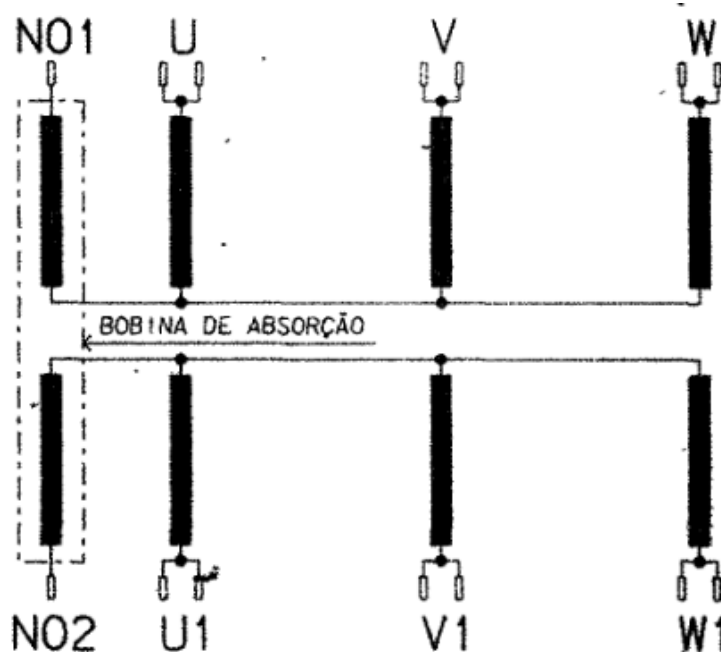


Figura 4.16 Enrolamentos de baixa tensão dos transformadores retificadores TR-05, TR-06, TR-07 e TR-08.

TERMINAIS	COMUTADOR		VOLTS	AMPÈRES	kVA
	POS	LIGA			
H1 H2 H3			14500	593,2 A 521,8	14897 A 13104
U V - NO1 W	A	3 - 7	162	21675	21068
	B	3 - 6	157		20418
	C	3 - 5	152		19768
U1 V1 - NO2 W1	D	2 - 5	147		19117
	E	2 - 4	142,5		18532
BOBINA DE ABSORÇÃO			2 x 115	2 x 37500	8624

Figura 4.17 Dados de placa dos transformadores retificadores TR-01, TR-02, TR-03 e TR-04 – cortesia ABB.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos retificadores de potência R-05, R-06, R-07 e R-08:

- ⇒ **Retificadores de potência R-05, R-06:** Retificador de potência tiristorizado, conectados em paralelo, tipo de conexão: dupla estrela, número de fases dupla estrela: 6 fases, número de tiristores em paralelo por fase: 8, tensão primária: 14,5kV /- 5%, tensão secundária: 171V (sem carga), frequência: 60Hz (+/- 1,5Hz), , tensão nominal contínua: 171Vdc, corrente nominal contínua total: 2x75kA, corrente nominal contínua por retificador: 75kA – 6 pulsos.

- ⇒ **Retificadores de potência R-07, R-08:** Retificador de potência tiristorizado, conectados em paralelo, tipo de conexão: dupla estrela, número de fases dupla estrela: 6 fases, número de tiristores em paralelo por fase: 8, tensão primária: 14,5kV /- 5%, tensão secundária: 171V (sem carga), frequência: 60Hz (+/- 1,5Hz), , tensão nominal contínua: 171Vdc, corrente nominal contínua total: 2x75kA, corrente nominal contínua por retificador: 75kA – 6 pulsos.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas da sala de eletrólise diafragma:

Ela é composta de 92 células divididas em dois circuitos elétricos com 46 células cada. Toda célula de tecnologia diafragma para produção de cloro e soda possui 6 partes essenciais:

- ⇒ Conjunto anódico: 87 ou 105 placas de titânio pintadas com uma tinta à base de metais nobres somando uma área total de 54,8 m² ou 66,1 m², localizados no interior do compartimento anódico.
- ⇒ Catodo: paralelepípedo oco com partes vazadas onde são encaixados os anodos, que serve de base para a deposição do diafragma. Podendo ser de 60 m² (conjunto anódico de 87 placas) ou 72 m² (conjunto anódico de 105 placas).
- ⇒ Diafragma: base de fibras de PTFE (teflon) e dióxido de zircônio, para separar os produtos do lado anódico e catódico;
- ⇒ Tampa de telene: isola os produtos das reações eletrolíticas da atmosfera;
- ⇒ Base de cobre: local onde os anodos são fixados;
- ⇒ Lençol de borracha ou EPDM revestido com teflon: protege a base de cobre de ataque químico da solução anolítica.

4.4 Sistema elétrico da eletrólise mercúrio

A eletrólise mercúrio é constituída de 43 células eletrolíticas formando um único circuito elétrico, sendo alimentado pelos retificadores de potência (R-09, R-10 e R-11), acoplados aos transformadores retificadores (TR-09, TR-10 e TR-11).

Os filtros harmônicos passivos ressonantes em 5° ordem (L-10/C-10), 7° ordem (L-11/C-11) e 11° ordem (L-09/C-09), estão conectados no painel de média tensão PMT-02 em 14,5kV, com a finalidade de reduzir os níveis de harmônicos nos retificadores e aumentar o fator de potência no barramento de 14,5kV.

Os retificadores de potência R-09, R-10 e R11, operam na topologia paralelo.

Os transformadores retificadores, por sua vez, recebem as alimentações do painel de média tensão PMT-02 em 14,5kV, instalado na sala de comando da subestação SUB-02.

Os transformadores principais TAR-02 e TAR-03, localizado na subestação SUB-02 são os responsáveis pelas alimentações do painel de média tensão PMT-02.

Segue abaixo o diagrama unifilar do sistema elétrico da eletrólise mercúrio:

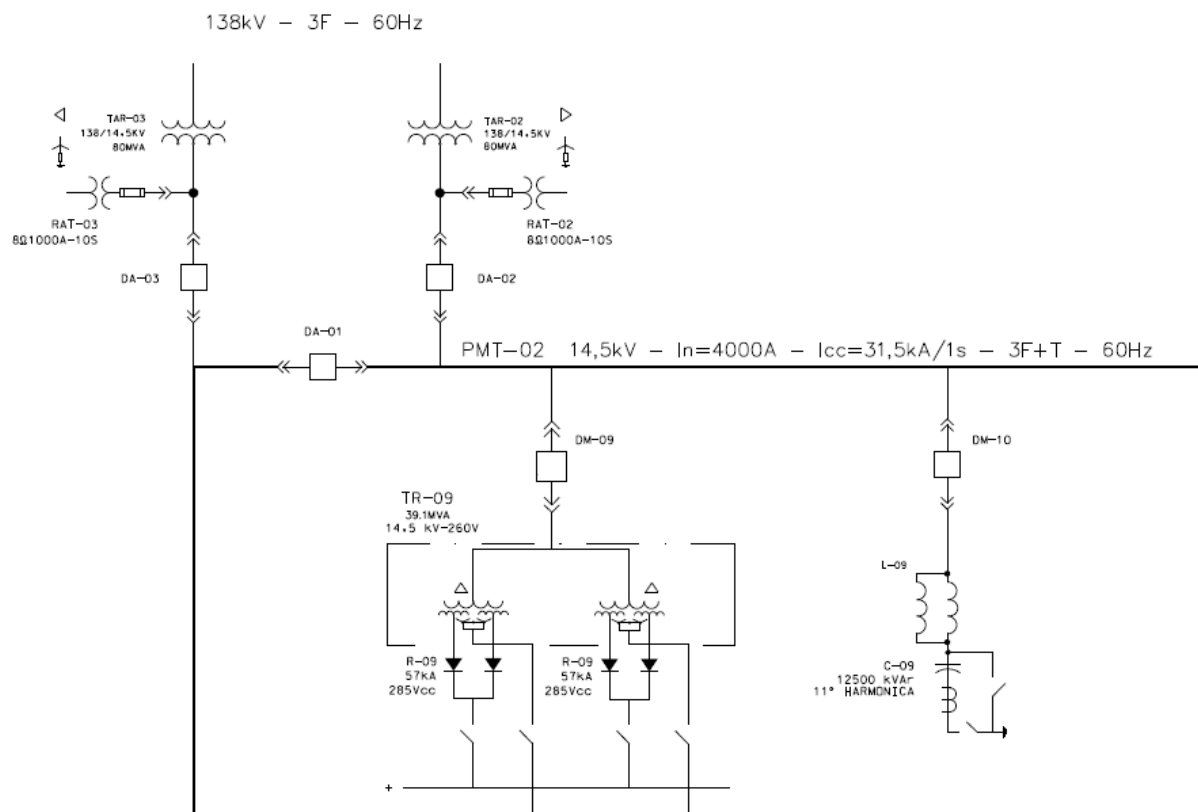


Figura 4.18 Diagrama unifilar sistema elétrico mercúrio (parte 1).

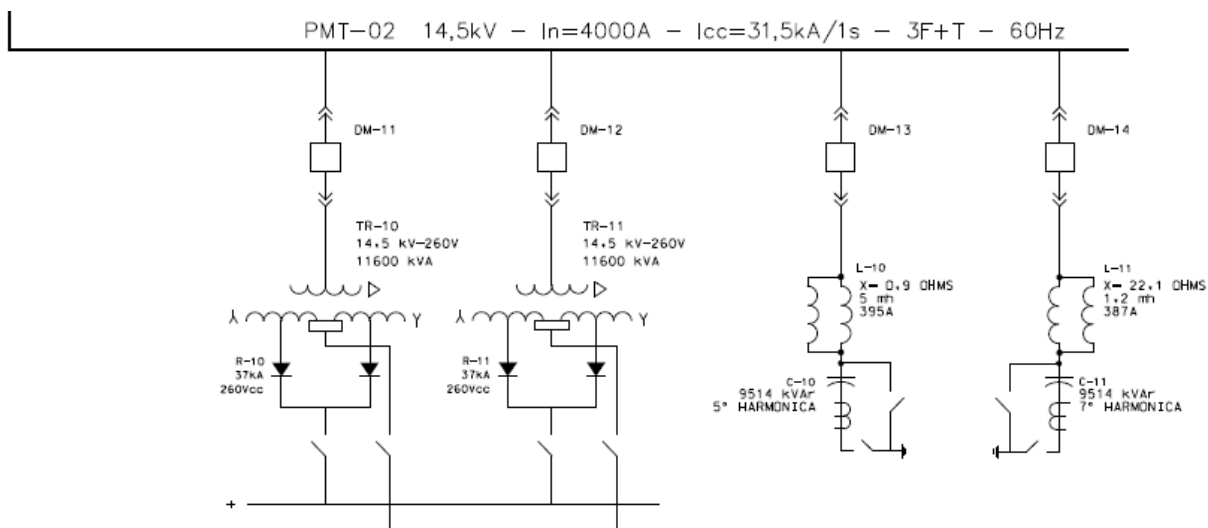


Figura 4.19 Diagrama unifilar sistema elétrico mercúrio (parte 2).

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos transformadores principais TAR-02, TAR-03:

- ⇒ **Transformadores principais TAR-02 e TAR-03:** Transformador de potência, trifásico, frequência: 60Hz, potência nominal: 80MVA (óleo natural, com a ventilação forçada), tensão primária: 138kV, tensão secundária: 14,5kV, impedância percentual à 85°C, 60Hz: 20,54%, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 650kV em H1-H2-H3, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 275kV, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 110kV em X1-X2-X3-X0, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 34kV em X1-X2-X3-X0.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas do painel de média tensão PMT-02:

- ⇒ **Painel de média tensão PMT-02:** Classe de tensão: 17,5kV; tensão de serviço: 14,5kV, frequência: 60Hz, tensão aplicada (1min): 38kV rms, NBI: 95kV, corrente térmica de curto-circuito: 31,5kA - 01seg, corrente dinâmica de curto-circuito: 80kAef (ASSIMÉTRICO), Corrente de resistência ao arco interno: 31,5kA - 01seg, corrente do barramento principal: 4000A.

- ⇒ **Cubículos de média tensão constituídos de:** Disjuntor à vácuo, 17,5kV, 1250A/2000A/4000A, composto de motor para carregamento de molas, 02 bobinas de abertura, bobina de fechamento, bobina de bloqueio do carro de extração, contador de manobras, contatos auxiliares (5NF+5NA), contatos de sinalização de posição do carro, dispositivo de bloqueio para a inserção, contatos auxiliares adicionais (3NF+2NA);

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos transformadores retificador TR-9, TR-10, e TR-11:

- ⇒ **Transformador retificador TR-09:** Transformador retificador, primário: trifásico, secundário: duplo hexafásico, potência enrolamento primário: 2x19,5MVA, corrente: 1552A, potência enrolamento secundário: 4x13,8MVA, corrente: 16470A de fase, ligação primária: estrela e delta, ligação secundária: 2 x dupla estrela, frequência: 60Hz, tensão primária: 14,5kV, tensão secundária: 260V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 8,0%, deslocamento angular: -15° / +15°, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 110kV em H1-H2-H3, impulso atmosférico (kV de crista): 50kV em R1, R2, R3, R4, R5, R6, R1', R2', R3', R4', R5', R6', tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 34kV em R1, R2, R3, R4, R5, R6, R1', R2', R3', R4', R5', R6'.
- ⇒ **Transformador retificador TR-10:** Transformador retificador, primário: trifásico, secundário: hexafásico, potência enrolamento primário: 1x11,57MVA, corrente: 462A, potência enrolamento secundário: 2x8,2MVA, potência bobinas de absorção: 2x5,46MVA ligação primária: delta, ligação secundária: 1xdupla estrela, frequência: 60Hz, tensão primária: 14,5kV, tensão secundária: 260V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 8,39%, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 150kV em H1-H2-H3, impulso atmosférico (kV de crista): 50kV em U, V, W, U1, V1, W1, N01, N02, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 50kV em U, V, W, U1, V1, W1 N01, N02.

⇒ **Transformador retificador TR-11:** Transformador retificador, primário: trifásico, secundário: hexafásico, potência enrolamento primário: 1x11,57MVA, corrente: 462A, potência enrolamento secundário: 2x8,2MVA, potência bobinas de absorção: 2x5,46MVA ligação primária: delta, ligação secundária: 1xdupla estrela, frequência: 60Hz, tensão primária: 14,5kV, tensão secundária: 260V, impedância percentual à 75°C, 60Hz: 5,70%, nível de isolamento impulso atmosférico (kV de crista): 150kV em H1-H2-H3, impulso atmosférico (kV de crista): 50kV em U, V, W, U1, V1, W1, N01, N02, tensão aplicada à frequência industrial (kV eficaz): 50kV em U, V, W, U1, V1, W1 N01, N02.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas dos retificadores de potência R-09, R-10 e R-11:

⇒ **Retificadores de potência R-09:** Retificador de potência tiristorizado, conectados em paralelo, tipo de conexão: 2 x dupla estrela, número de fases 2 x dupla estrela: 6 fases, número de tiristores em paralelo por fase: 6, tensão primária: 14,5kV /- 5%, tensão secundária: V (sem carga), frequência: 60Hz (+/- 1,5Hz), , tensão nominal contínua: 285Vdc, corrente nominal contínua total: 114kA.

⇒ **Retificadores de potência R-10, R-11:** Retificador de potência tiristorizado, conectados em paralelo, tipo de conexão: dupla estrela, número de fases dupla estrela: 6 fases, número de tiristores em paralelo por fase: 8, tensão primária: 14,5kV /- 5%, tensão secundária: 260V (sem carga), frequência: 60Hz (+/- 1,5Hz), , tensão nominal contínua: 260Vdc, corrente nominal contínua total:37kA.

Segue abaixo informações detalhadas das características técnicas da sala de eletrólise mercúrio:

Toda célula de tecnologia mercúrio para produção de cloro e soda possui 3 partes essenciais:

- ⇒ Conjunto anódico: 28 placas de titânio com uma pintura à base de metais nobres somando uma área total de 11,48 m²;
- ⇒ Catodo: Camada de 3 mm de mercúrio;
- ⇒ Cuba eletrolítica: compartimento onde está localizado o catodo e o anodo;
- ⇒ Cabeceira de entrada: Compartimento de alimentação de mercúrio
- ⇒ Cabeceira de saída: Compartimento de separação da salmoura gasta e da amalgama de sódio;
- ⇒ Decompositor: compartimento onde ocorre a decomposição da amálgama de sódio;
- ⇒ Cesto de carvão:
- ⇒ Caixa de mercúrio
- ⇒ Bomba de mercúrio: Alimenta o mercúrio na cuba.

5.CONSUMOS ENERGÉTICOS DAS ELETRÓLISES

5.1 Introdução

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os consumos energéticos das células eletrolíticas empregando tecnologia diafragma tipo amianto utilizando catodo modelo MDC-55, células eletrolíticas empregando tecnologia diafragma tipo PMX (fibra sintética PTFE + dióxido de zircônio) utilizando catodos modelos MDC-55 e BP-66, células eletrolíticas empregando tecnologia em mercúrio, células eletrolíticas empregando tecnologia em membrana;

5.2 Consumo energético da célula eletrolítica diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55

Conforme levantamento de dados realizados no ano de 2005, seguem as medições das variáveis conforme tabelas abaixo, referente as células eletrolíticas diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55, com o objetivo de apresentar valores quanto ao consumo específico (DCKWh/tCl₂), consumo total de energia (MW) e eficiência (%), sendo considerados somente 01 circuito da sala de células diafragma que disponibiliza para a produção de cloro 46 células eletrolíticas.

CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55		
JANEIRO 2005			FEVEREIRO 2005		
Nº de células	46		Nº de células	45	
Carga	140,1	kA	Carga	147,2	kA
Eficiência	96,2	%	Eficiência	96	%
Produção de Cloro	8,20	Ton/h	Produção de Cloro	8,41	Ton/h
kF	0,5065	V.m ² /kA	kF	0,5105	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem	3,77	V	Voltagem	3,72	V
Consumo Específico	2962,88	DCKWh/t Cl ₂	Consumo Específico	2929,67	DCKWh/t Cl ₂

CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55		
MARÇO 2005			ABRIL 2005		
Nº de células	45		Nº de células	40	
Carga	147	kA	Carga	146,5	kA
Eficiência	95,6	%	Eficiência	95	%
Produção de Cloro	8,36	Ton/h	Produção de Cloro	7,36	Ton/h
kF	0,5108	V.m ² /kA	kF	0,5209	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem	3,75	V	Voltagem	3,74	V
Consumo Específico	2965,66	DCKWh/t Cl₂	Consumo Específico	2978,46	DCKWh/t Cl₂
CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55		
MAIO 2005			JUNHO 2005		
Nº de células	44		Nº de células	45	
Carga	146,9	kA	Carga	147	kA
Eficiência	95,3	%	Eficiência	94,6	%
Produção de Cloro	8,15	Ton/h	Produção de Cloro	8,28	Ton/h
kF	0,5108	V.m ² /kA	kF	0,5107	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem	3,72	V	Voltagem	3,72	V
Consumo Específico	2951,19	DCKWh/t Cl₂	Consumo Específico	2973,03	DCKWh/t Cl₂
CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55		
JULHO 2005			AGOSTO 2005		
Nº de células	45		Nº de células	46	
Carga	146,8	kA	Carga	146,9	kA
Eficiência	94,8	%	Eficiência	95,5	%
Produção de Cloro	8,28	Ton/h	Produção de Cloro	8,54	Ton/h
kF	0,4908	V.m ² /kA	kF	0,5103	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem	3,66	V	Voltagem	3,72	V
Consumo Específico	2922,71	DCKWh/t Cl₂	Consumo Específico	2945,01	DCKWh/t Cl₂
CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55		
SETEMBRO 2005			OUTUBRO 2005		
Nº de células	43		Nº de células	45	
Carga	146,9	kA	Carga	146,9	kA
Eficiência	95,7	%	Eficiência	95,3	%
Produção de Cloro	8,00	Ton/h	Produção de Cloro	8,33	Ton/h
kF	0,5108	V.m ² /kA	kF	0,5105	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem	3,72	V	Voltagem	3,72	V
Consumo Específico	2938,86	DCKWh/t Cl₂	Consumo Específico	2951,19	DCKWh/t Cl₂

CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA AMIANTO CATODO MDC-55		
NOVEMBRO 2005			DEZEMBRO 2005		
Nº de células	46		Nº de células	45	
Carga	146,7	kA	Carga	147	kA
Eficiência	95,3	%	Eficiência	94,9	%
Produção de Cloro	8,51	Ton/h	Produção de Cloro	8,30	Ton/h
kF	0,5109	V.m ² /kA	kF	0,5106	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem	3,72	V	Voltagem	3,72	V
Consumo Específico	2951,19	DKWh/t Cl₂	Consumo Específico	2963,63	DKWh/t Cl₂

Tabela 5.1 Medições das variáveis células eletrolíticas diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55.

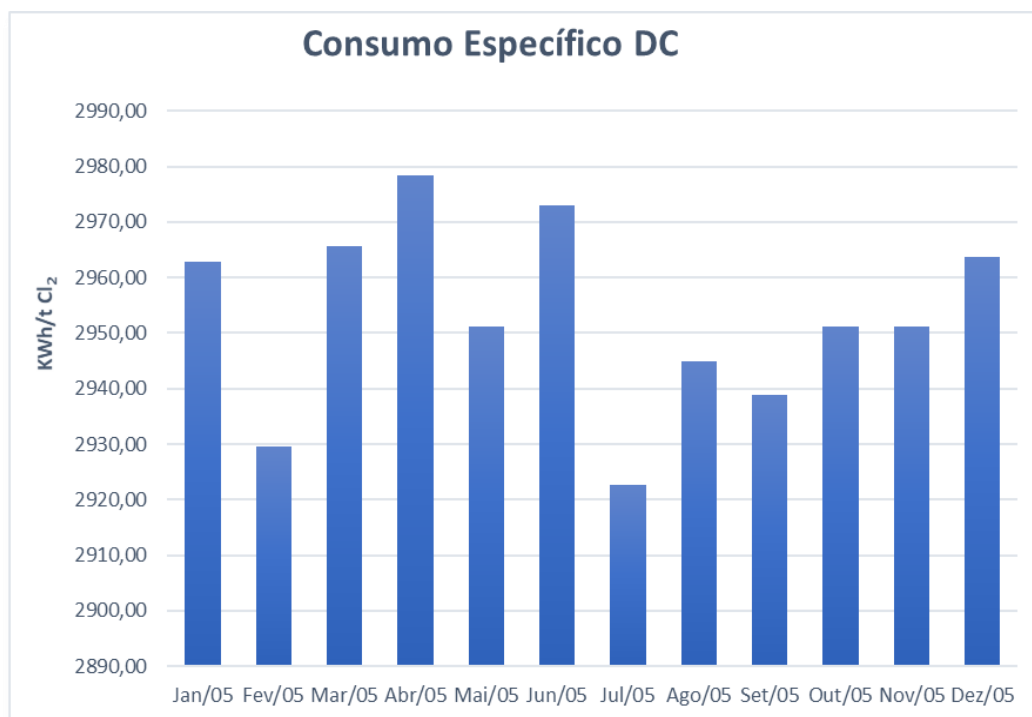


Figura 5.1 Consumo específico DC da célula diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55

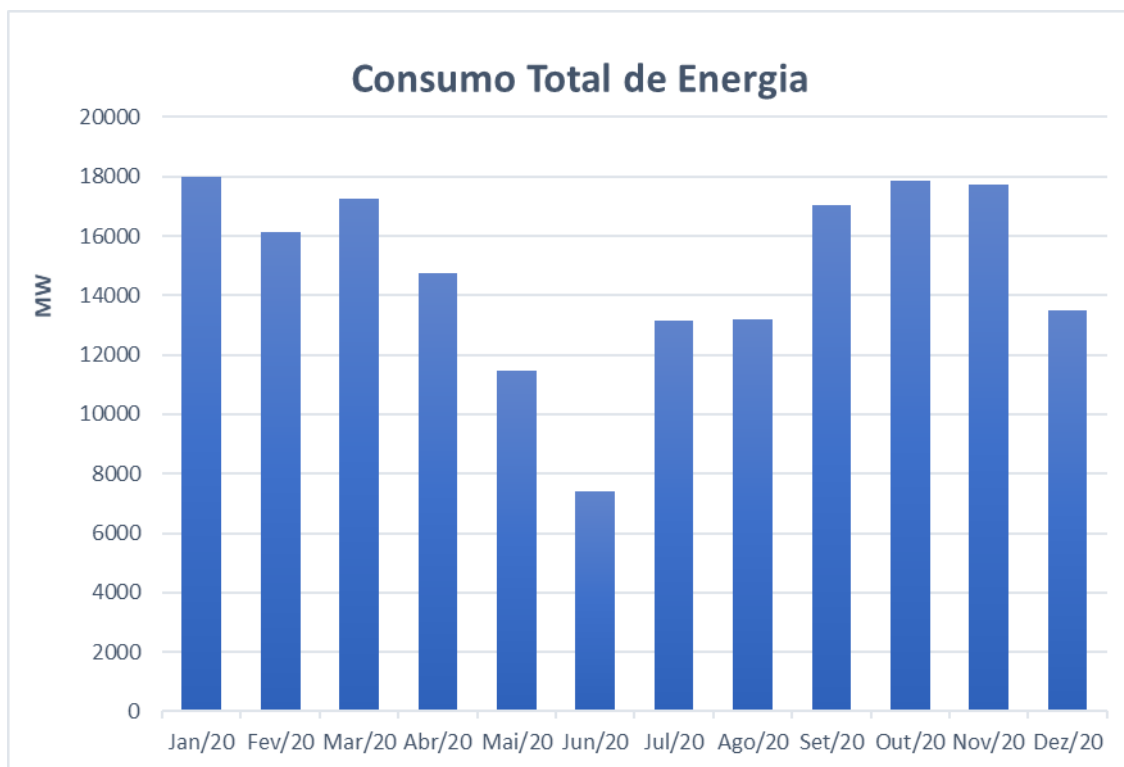


Figura 5.2 Consumo total de energia da célula diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55.

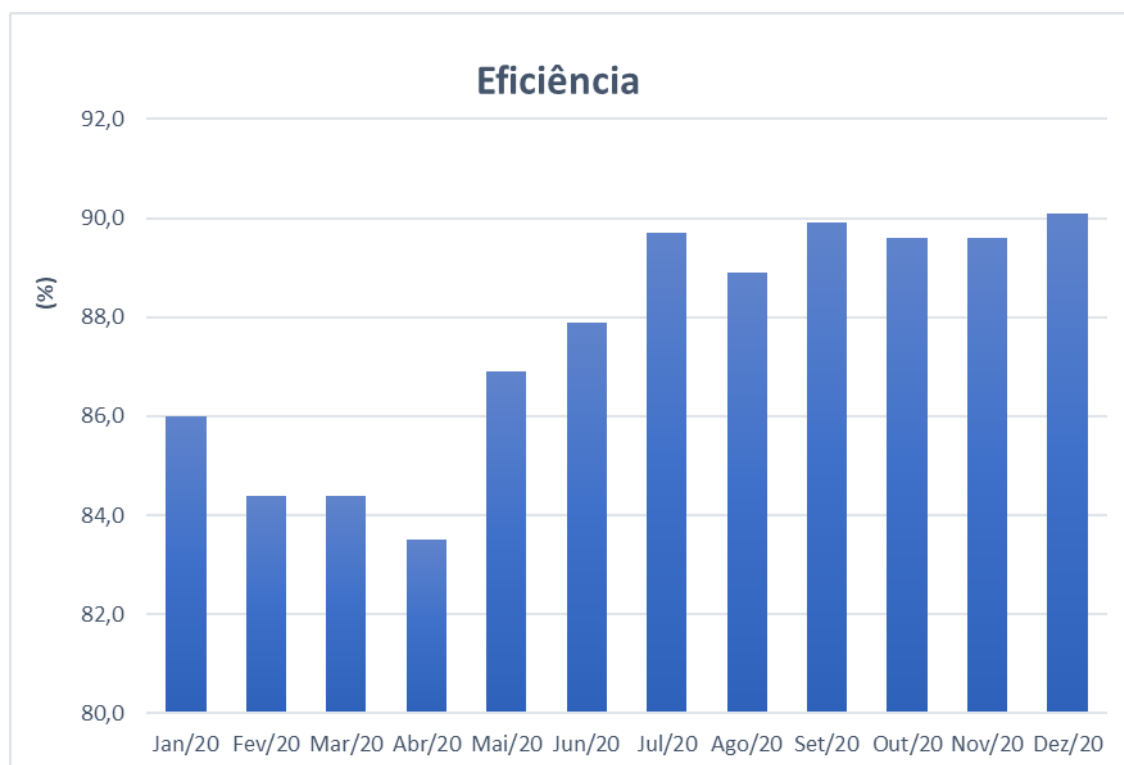


Figura 5.3 Eficiência da célula diafragma tipo amianto catodo modelo MDC-55.

5.3 Consumo energético da célula eletrolítica diafragma tipo PMX catodo MDC-55

Conforme levantamento de dados realizados no ano de 2015, seguem as medições das variáveis conforme tabelas abaixo, referente as células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55, com o objetivo de apresentar valores quanto ao consumo específico (DCKWh/tCL₂), consumo total de energia (MW) e eficiência (%), sendo considerados somente 01 circuito da sala de células diafragma que disponibiliza para a produção de cloro 46 células eletrolíticas.

CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55		
JANEIRO 2015			FEVEREIRO 2015		
Nº de células	46		Nº de células	45	
Carga	128,9	kA	Carga	110,9	kA
Eficiência	90,6	%	Eficiência	87,8	%
Produção de Cloro	7,11	Ton/h	Produção de Cloro	5,80	Ton/h
kF	0,445	V.m ² /kA	kF	0,452	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem por Célula	3,53	V	Voltagem por Célula	3,55	V
Consumo Específico	2945,74	DCKWh/t Cl₂	Consumo Específico	3056,90	DCKWh/t Cl₂
CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55		
MARÇO 2015			ABRIL 2015		
Nº de células	45		Nº de células	44	
Carga	74,7	kA	Carga	108,7	kA
Eficiência	88,2	%	Eficiência	85,2	%
Produção de Cloro	3,92	Ton/h	Produção de Cloro	5,39	Ton/h
kF	0,443	V.m ² /kA	kF	0,445	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem por Célula	3,52	V	Voltagem por Célula	3,55	V
Consumo Específico	3017,32	DCKWh/t Cl₂	Consumo Específico	3150,19	DCKWh/t Cl₂

CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55		
MAIO 2015			JUNHO 2015		
Nº de células	43		Nº de células	42	
Carga	107	kA	Carga	139,9	kA
Eficiência	84,3	%	Eficiência	86	%
Produção de Cloro	5,13	Ton/h	Produção de Cloro	6,68	Ton/h
kF	0,442	V.m ² /kA	kF	0,442	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem por Célula	3,51	V	Voltagem por Célula	3,55	V
Consumo Específico	3147,94	DCKWh/t Cl2	Consumo Específico	3120,88	DCKWh/t Cl2
CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55		
JULHO 2015			AGOSTO 2015		
Nº de células	42		Nº de células	45	
Carga	122,1	kA	Carga	145,7	kA
Eficiência	87,5	%	Eficiência	86,5	%
Produção de Cloro	5,94	Ton/h	Produção de Cloro	7,50	Ton/h
kF	0,446	V.m ² /kA	kF	0,45	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem por Célula	3,54	V	Voltagem por Célula	3,50	V
Consumo Específico	3058,74	DCKWh/t Cl2	Consumo Específico	3059,14	DCKWh/t Cl2
CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55		
SETEMBRO 2015			OUTUBRO 2015		
Nº de células	44		Nº de células	46	
Carga	103,7	kA	Carga	115,4	kA
Eficiência	88,4	%	Eficiência	87,9	%
Produção de Cloro	5,34	Ton/h	Produção de Cloro	6,17	Ton/h
kF	0,435	V.m ² /kA	kF	0,442	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem por Célula	3,52	V	Voltagem por Célula	3,45	V
Consumo Específico	3010,49	DCKWh/t Cl2	Consumo Específico	2967,41	DCKWh/t Cl2
CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55		
NOVEMBRO 2015			DEZEMBRO 2015		
Nº de células	46		Nº de células	45	
Carga	145,4	kA	Carga	98,3	kA
Eficiência	89,3	%	Eficiência	89,6	%
Produção de Cloro	7,90	Ton/h	Produção de Cloro	5,24	Ton/h
kF	0,448	V.m ² /kA	kF	0,438	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²	Área anódica	54,8	m ²
Voltagem por Célula	3,61	V	Voltagem por Célula	3,51	V
Consumo Específico	3056,35	DCKWh/t Cl2	Consumo Específico	2961,74	DCKWh/t Cl2

Tabela 5.2 Medições das variáveis células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.

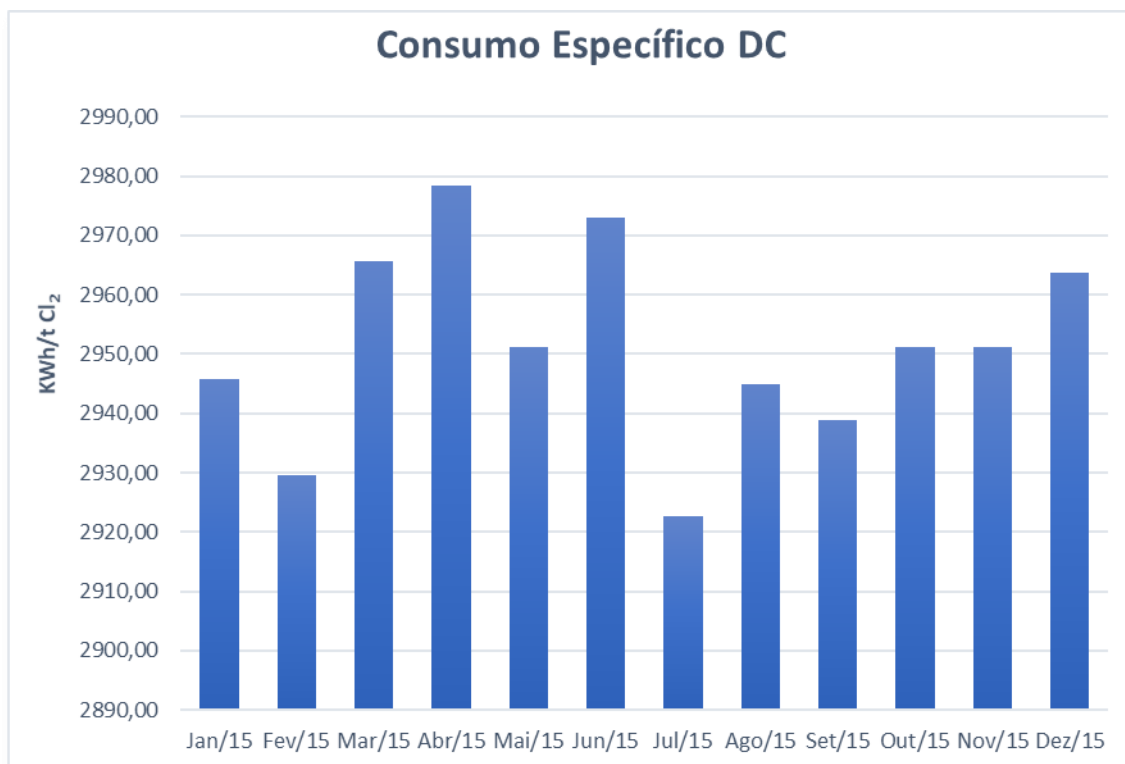


Figura 5.4 Consumo específico DC da célula diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.

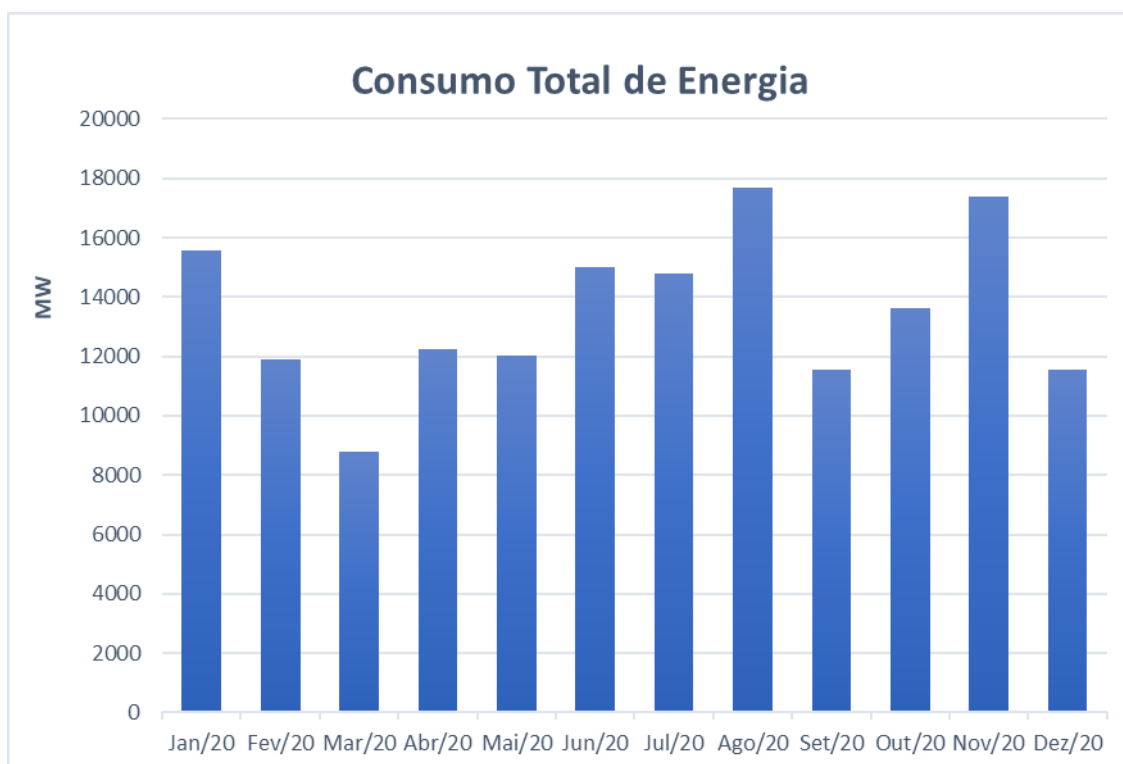


Figura 5.5 Consumo total de energia da célula diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.

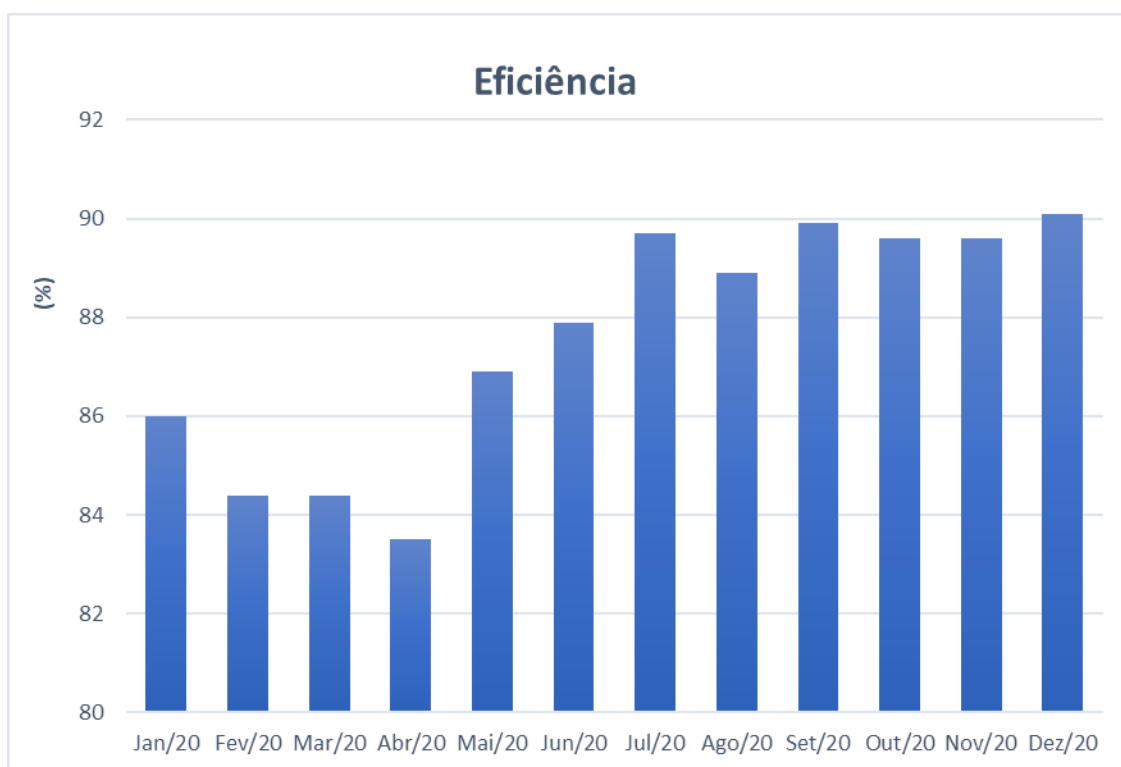


Figura 5.6 Eficiência da célula diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55.

5.4 Consumo energético da célula eletrolítica diafragma tipo PMX catodo BP-66

Conforme levantamento de dados realizados no ano de 2020, seguem as medições das variáveis conforme tabelas abaixo, referente as células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66, com o objetivo de apresentar valores quanto ao consumo específico (DCKWh/tCL₂), consumo total de energia (MW) e eficiência (%), sendo considerados somente 01 circuito da sala de células diafragma que disponibiliza para a produção de cloro 46 células eletrolíticas.

CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66		CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66	
JANEIRO 2020		FEVEREIRO 2020	
Nº de células	46	Nº de células	45
Carga	144,3 kA	Carga	146,5 kA
Eficiência	86 %	Eficiência	84,4 %
Produção de Cloro	7,55 Ton/h	Produção de Cloro	7,36 Ton/h
kF	0,491 V.m ² /kA	kF	0,485 V.m ² /kA
Área anódica	66,12 m ²	Área anódica	66,12 m ²
Voltagem	3,64 V	Voltagem	3,64 V
Consumo Específico	3200,00 DCKWh/Ton Cl ₂	Consumo Específico	3260,67 DCKWh/Ton Cl ₂

CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66		
MARÇO 2020			ABRIL 2020		
Nº de células	45		Nº de células	44	
Carga	141,7	kA	Carga	126,7	kA
Eficiência	84,4	%	Eficiência	83,5	%
Produção de Cloro	7,12	Ton/h	Produção de Cloro	6,16	Ton/h
kF	0,485	V.m ² /kA	kF	0,496	V.m ² /kA
Área anódica	66,12	m ²	Área anódica	66,12	m ²
Voltagem	3,64	V	Voltagem	3,67	V
Consumo Específico	3260,67	DCKWh/Ton Cl₂	Consumo Específico	3322,97	DCKWh/Ton Cl₂
CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66		
MAIO 2020			JUNHO 2020		
Nº de células	43		Nº de células	42	
Carga	100,1	kA	Carga	68,6	kA
Eficiência	86,9	%	Eficiência	87,9	%
Produção de Cloro	4,95	Ton/h	Produção de Cloro	3,35	Ton/h
kF	0,508	V.m ² /kA	kF	0,502	V.m ² /kA
Área anódica	66,12	m ²	Área anódica	66,12	m ²
Voltagem	3,58	V	Voltagem	3,56	V
Consumo Específico	3114,66	DCKWh/Ton Cl₂	Consumo Específico	3062,02	DCKWh/Ton Cl₂
CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66		
JULHO 2020			AGOSTO 2020		
Nº de células	46		Nº de células	45	
Carga	107,5	kA	Carga	105,8	kA
Eficiência	89,7	%	Eficiência	88,9	%
Produção de Cloro	5,87	Ton/h	Produção de Cloro	5,60	Ton/h
kF	0,509	V.m ² /kA	kF	0,514	V.m ² /kA
Área anódica	66,12	m ²	Área anódica	66,12	m ²
Voltagem	3,57	V	Voltagem	3,72	V
Consumo Específico	3009,01	DCKWh/Ton Cl₂	Consumo Específico	3163,65	DCKWh/Ton Cl₂
CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66		
SETEMBRO 2020			OUTUBRO 2020		
Nº de células	45		Nº de células	46	
Carga	143,2	kA	Carga	142,3	kA
Eficiência	89,9	%	Eficiência	89,6	%
Produção de Cloro	7,66	Ton/h	Produção de Cloro	7,76	Ton/h
kF	0,51	V.m ² /kA	kF	0,524	V.m ² /kA
Área anódica	66,12	m ²	Área anódica	66,12	m ²
Voltagem	3,68	V	Voltagem	3,67	V
Consumo Específico	3094,82	DCKWh/Ton Cl₂	Consumo Específico	3096,74	DCKWh/Ton Cl₂

CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66			CÉLULA DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66		
NOVEMBRO 2020			DEZEMBRO 2020		
Nº de células	45		Nº de células	44	
Carga	145,1	kA	Carga	109,7	kA
Eficiência	89,6	%	Eficiência	90,1	%
Produção de Cloro	7,74	Ton/h	Produção de Cloro	5,75	Ton/h
kF	0,528	V.m ² /kA	kF	0,54	V.m ² /kA
Área anódica	66,12	m ²	Área anódica	66,12	m ²
Voltagem	3,77	V	Voltagem	3,76	V
Consumo Específico	3181,12	DCKWh/Ton Cl₂	Consumo Específico	3155,08	DCKWh/Ton Cl₂

Tabela 5.3 Medições das variáveis células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66

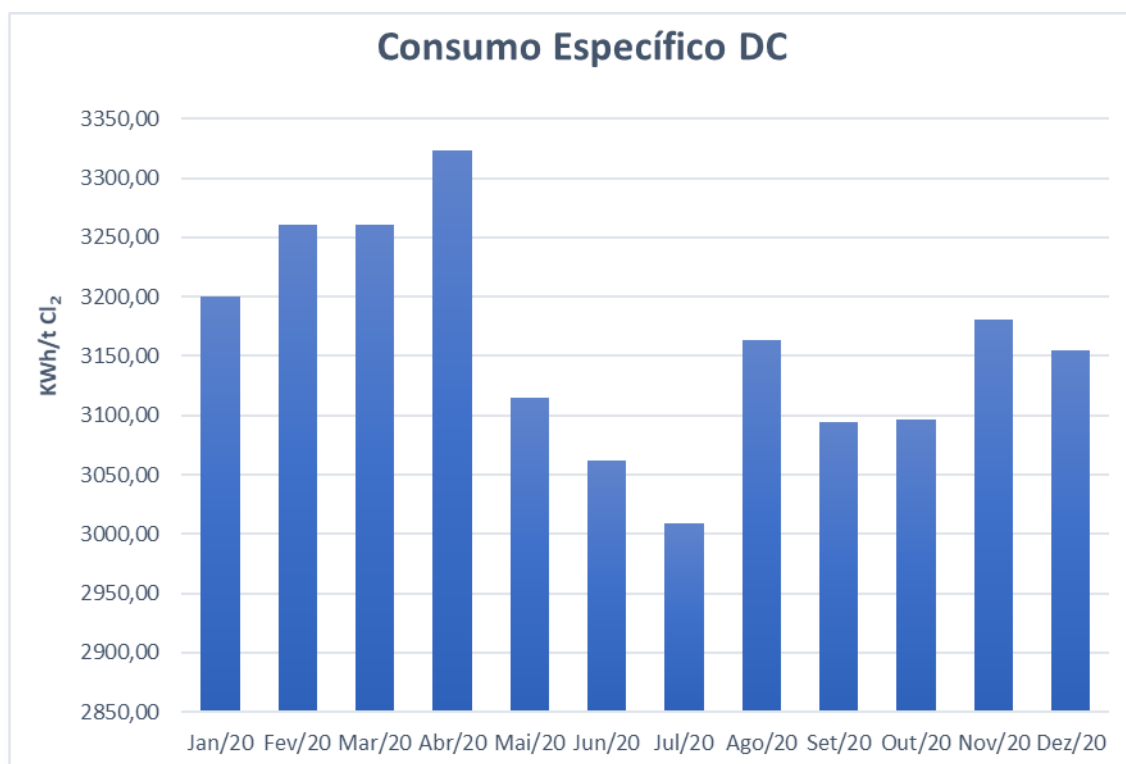


Figura 5.7 Consumo específico DC da célula diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.

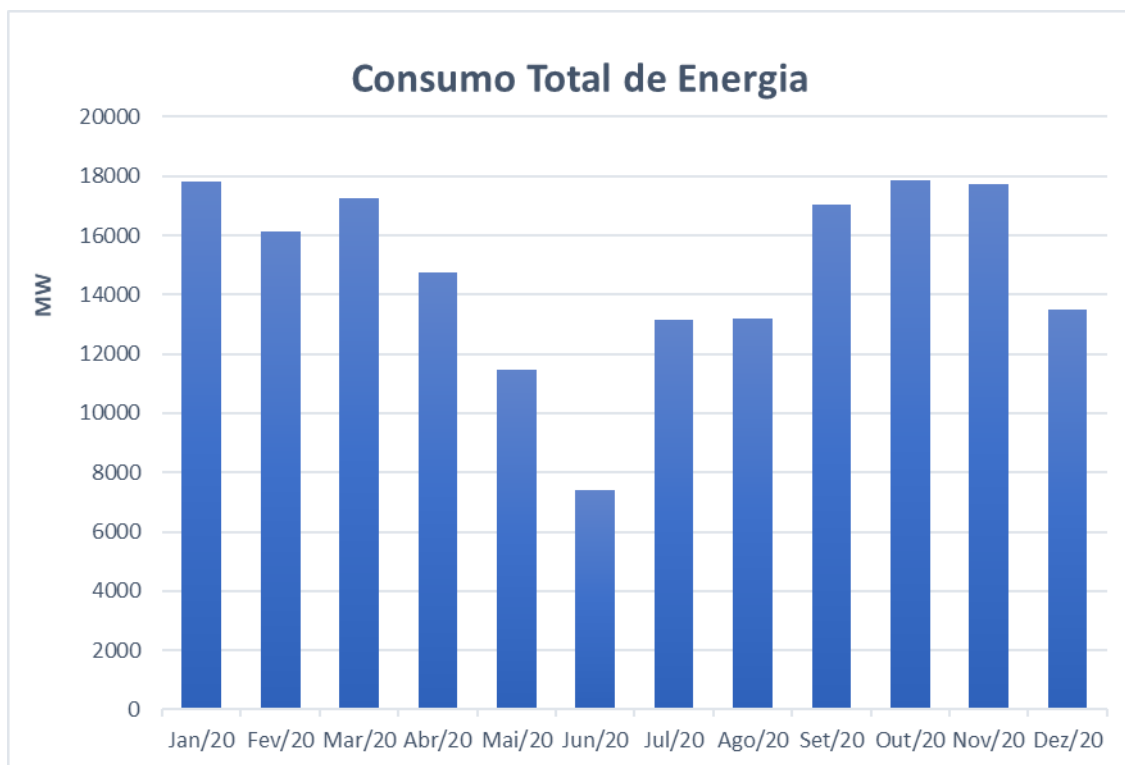


Figura 5.8 Consumo total de energia da célula diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.

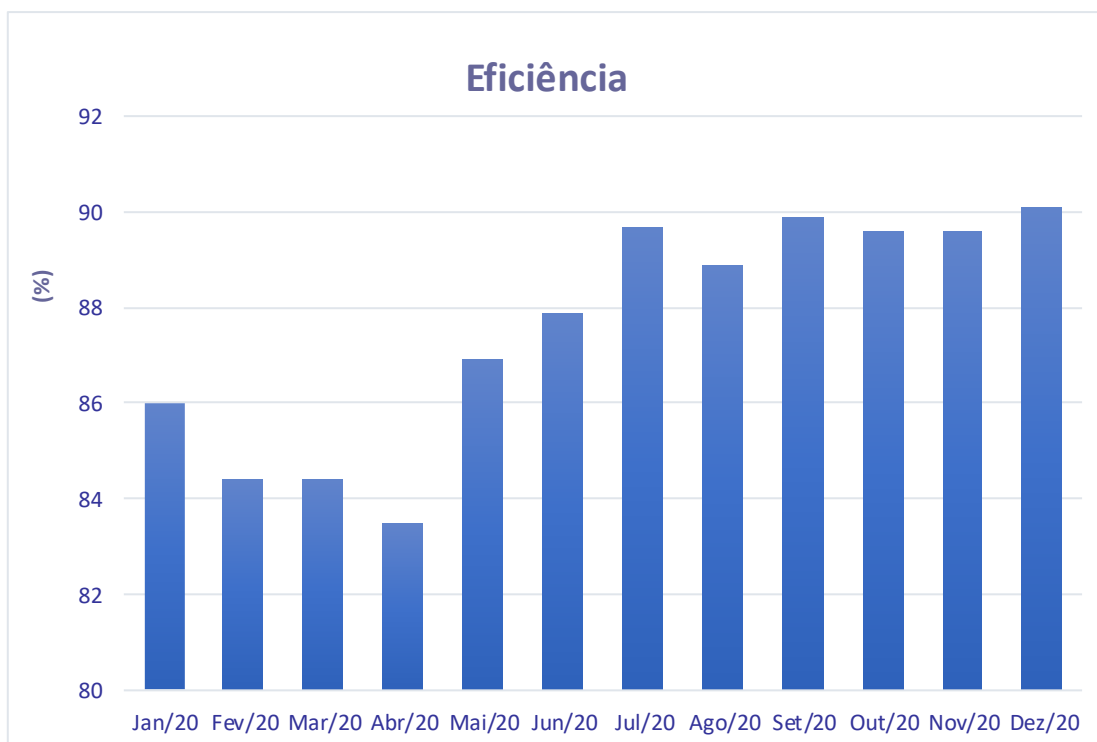


Figura 5.9 Eficiência da célula diafragma tipo PMX catodo modelo BP-66.

Segue as medições das variáveis conforme tabelas abaixo, referente as células eletrolíticas diafragma tipo amianto catodo MDC-55, células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo modelo MDC-55 e células eletrolíticas diafragma tipo PMX catodo BP-66, com o objetivo de apresentar valores quanto ao consumos específicos (DCKWh/tCL₂), considerando 02 circuitos da sala de células diafragma operando com capacidade nominal.

CÉLULAS DIAFRAGAMA AMIANTO CATODO MDC-55		
Nº de células	92	
Carga	150	kA
Eficiência	95,3	%
Produção de Cloro	17,40	Ton/h
kF	0,5065	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²
Voltagem	3,74	V
Consumo Específico	2964,21	DCKWh/Ton Cl₂

CÉLULAS DIAFRAGMA PMX CATODO MDC-55		
Nº de células	92	
Carga	150	kA
Eficiência	91,1	%
Produção de Cloro	16,63	Ton/h
kF	0,521	V.m ² /kA
Área anódica	54,8	m ²
Voltagem por Célula	3,78	V
Consumo Específico	3133,80	DCKWh/Ton Cl₂

CÉLULAS DIAFRAGMA PMX CATODO BP-66		
Nº de células	92	
Carga	150	kA
Eficiência	91,1	%
Produção de Cloro	16,63	Ton/h
kF	0,521	V.m ² /kA
Área anódica	66,12	m ²
Voltagem	3,53	V
Consumo Específico	2931,18	DCKWh/Ton Cl₂

Tabela 5.4 Consumos específicos dos tipos de células eletrolíticas diafragma.

5.5 Capacidade de produção de cloro das células eletrolíticas diafragma

Conforme levantamento de dados realizados nos anos de 2005, 2015 e 2020, seguem as capacidades de produção de cloro das células eletrolíticas diafragma, sendo considerados 02 circuitos da sala de células diafragma, disponibilizando para a produção de cloro 96 células eletrolíticas.

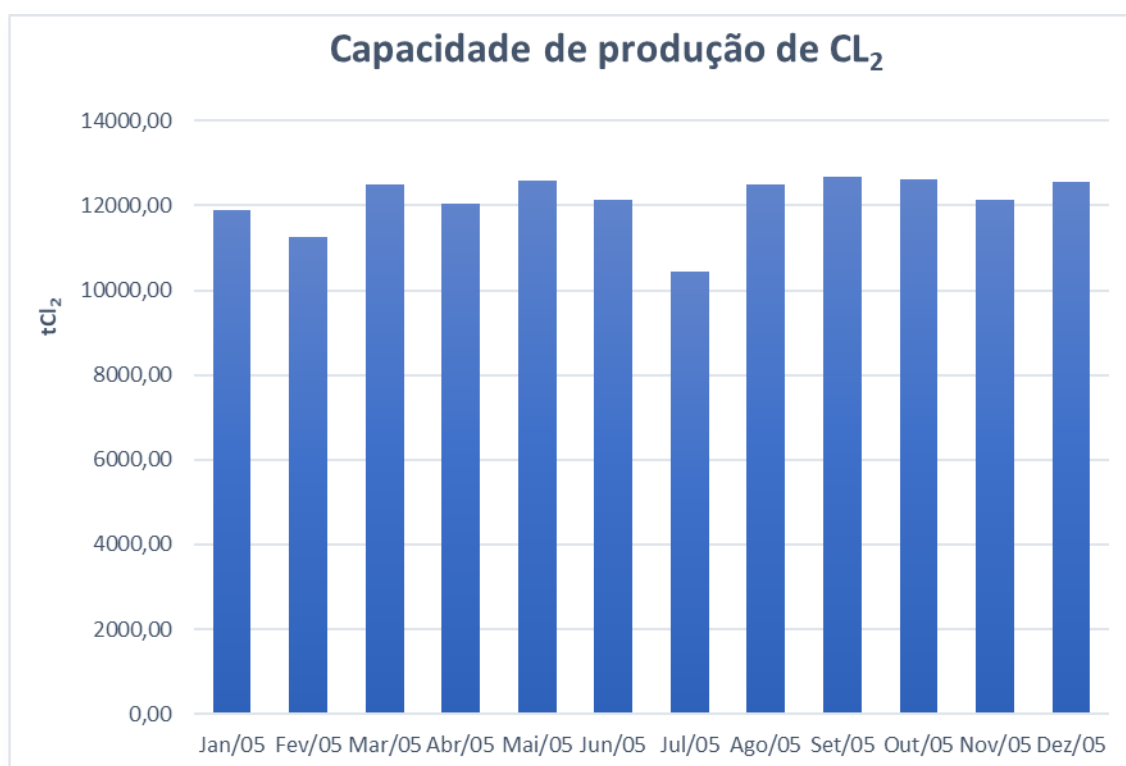


Figura 5.10 Capacidade de produção de CL₂ no ano de 2005 da sala de células diafragma (Amianto catodo MDC-55).

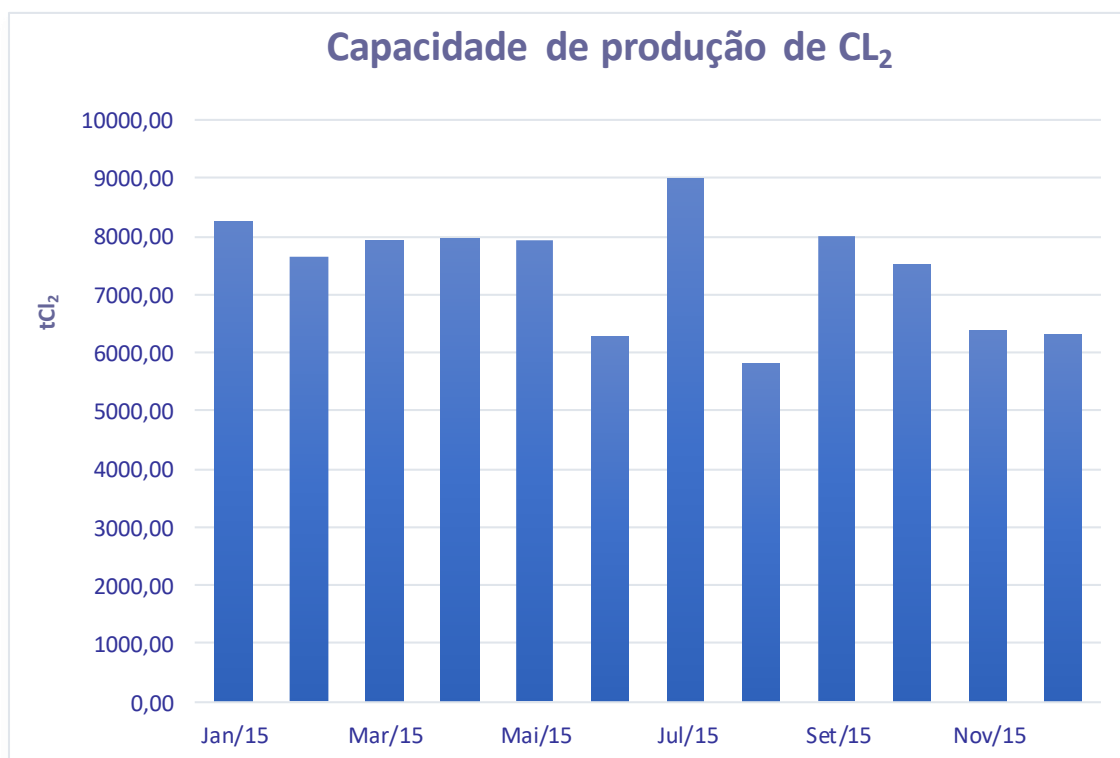


Figura 5.11 Capacidade de produção de CL₂ no ano de 2015 da sala de células diafragma (PMX catodo MDC-55).

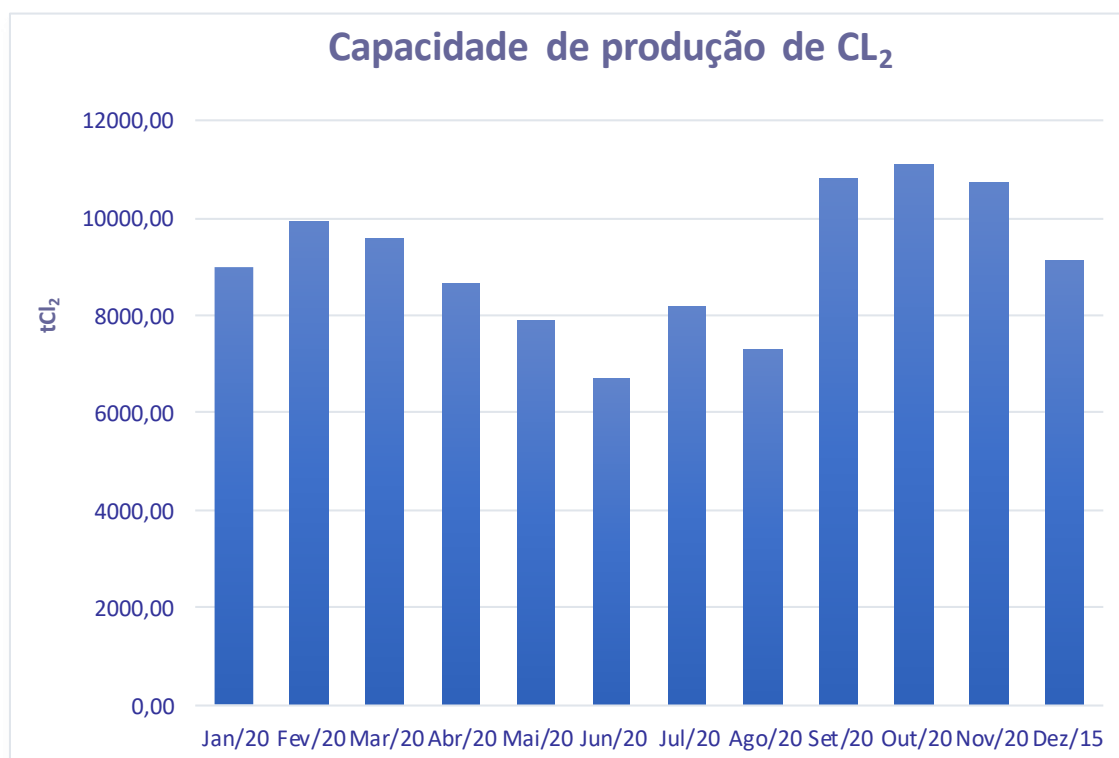


Figura 5.12 Capacidade de produção de CL₂ no ano de 2020 da sala de células diafragma (PMX catodo BP-66).

5.6 Consumo total de energia das células eletrolíticas diafragma

Conforme levantamento de dados realizados nos anos de 2005, 2015 e 2020, seguem os consumos total de energia das células eletrolíticas diafragma, sendo considerados 02 circuitos da sala de células diafragma, disponibilizando para a produção de cloro 96 células eletrolíticas.

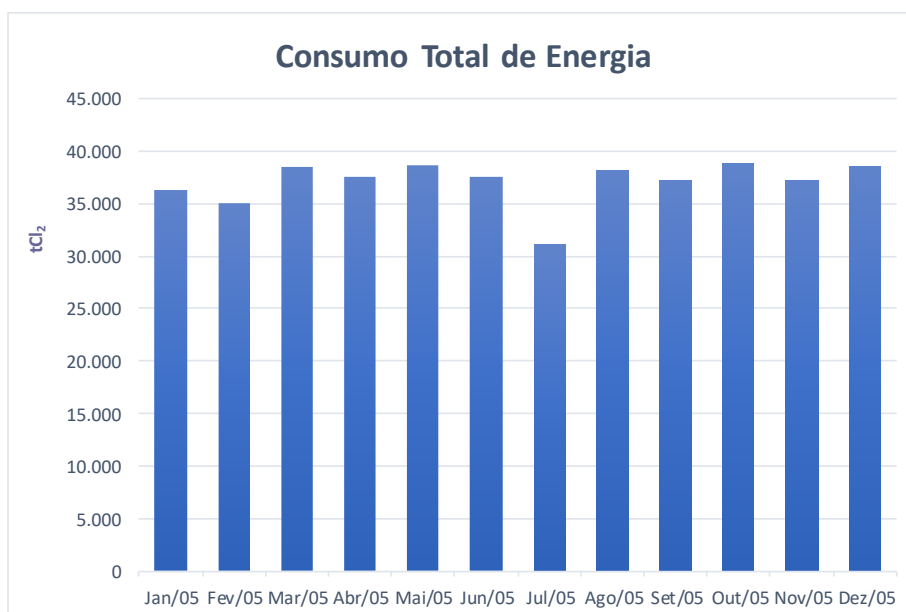


Figura 5.13 Consumo total de energia da célula eletrolítica diafragma no ano de 2005.

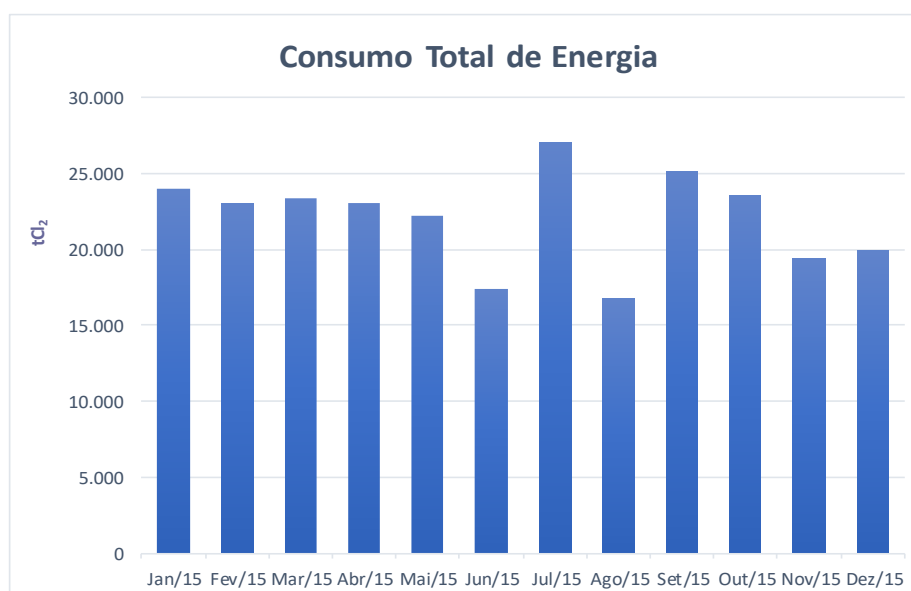


Figura 5.14 Consumo total de energia da célula eletrolítica diafragma no ano de 2015.

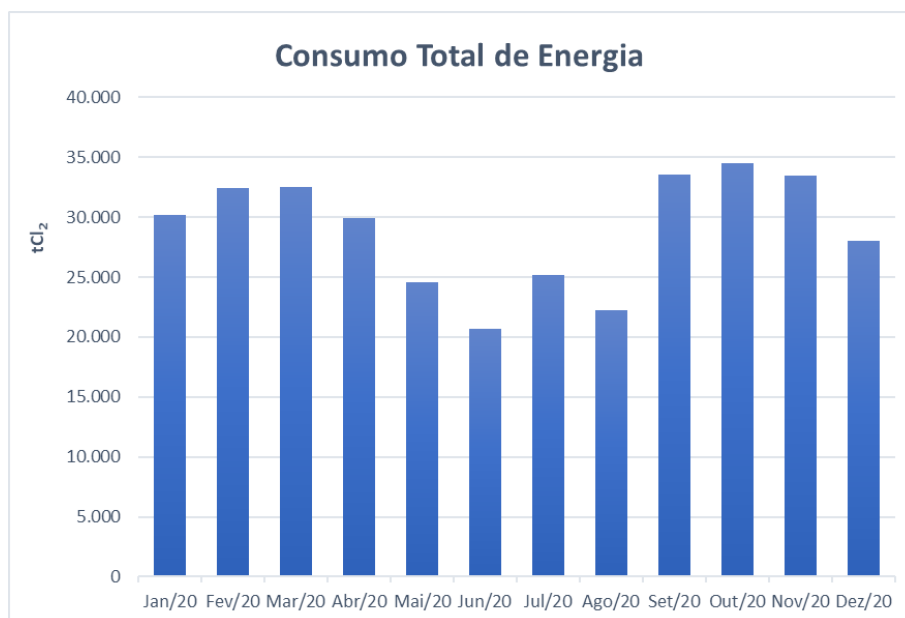


Figura 5.15 Consumo total de energia da célula eletrolítica diafragma no ano de 2020.

5.7 Consumo energético da célula eletrolítica mercúrio

Conforme levantamento de dados realizado no ano de 2020, seguem os gráficos apresentando a carga média, tensão média por célula consumo total de energia (MW), eficiência (%) e capacidade de produção de Cl₂, da sala de células eletrolíticas mercúrio.

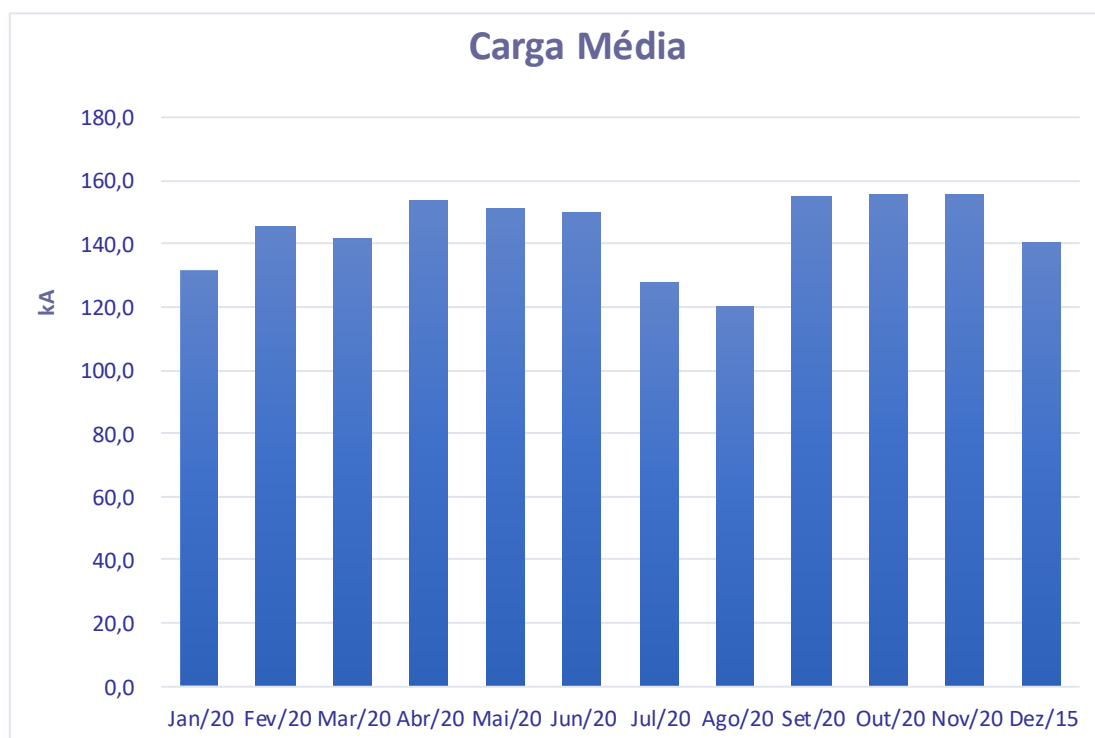


Figura 5.16 Carga média em (kA) da sala de células mercúrio no ano de 2020.

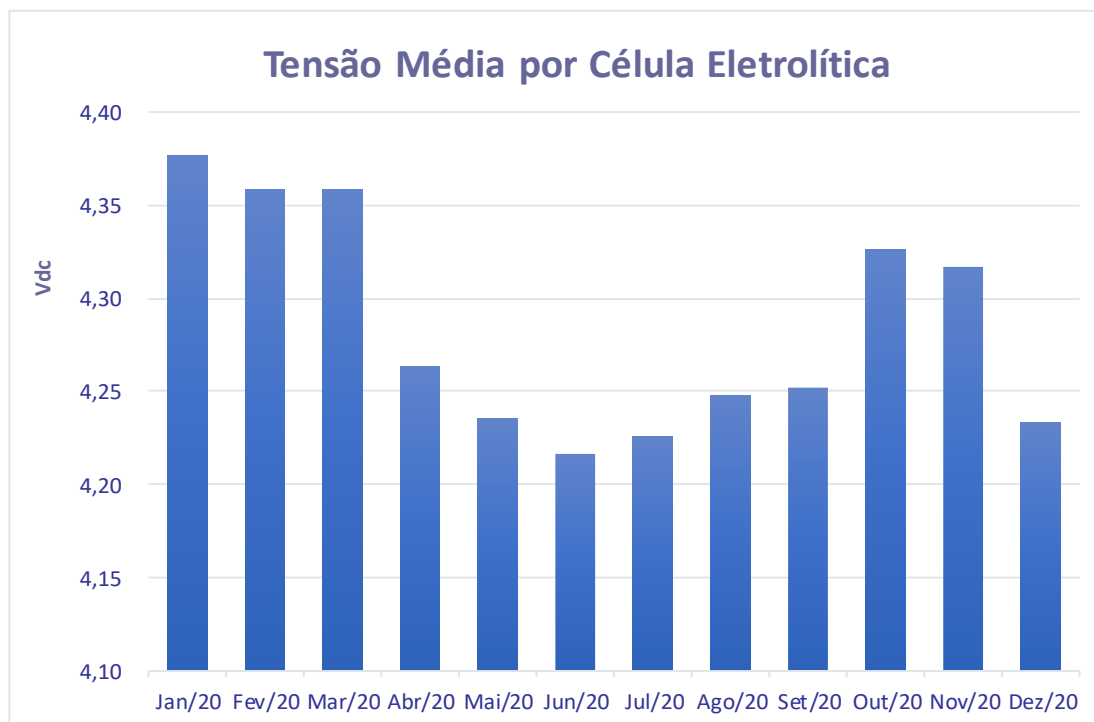


Figura 5.17 Tensão média por célula eletrolítica da sala de células mercúrio no ano de 2020.

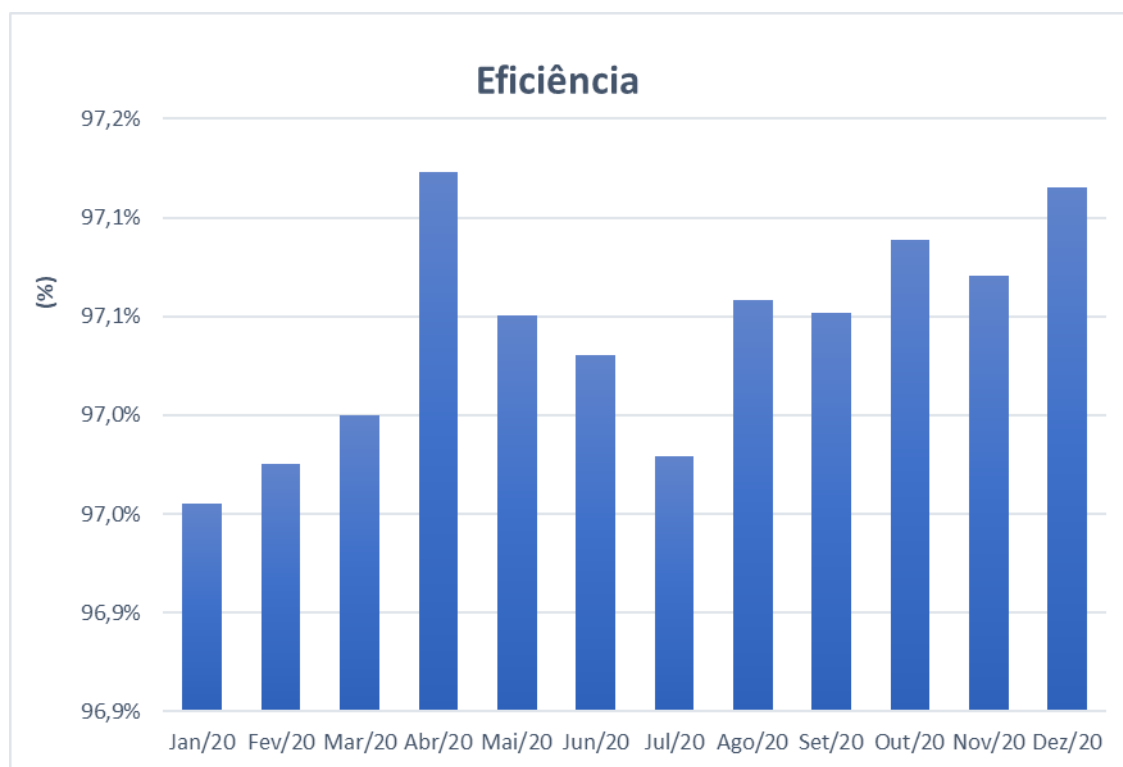


Figura 5.18 Eficiência da célula eletrolítica mercúrio no ano de 2020.

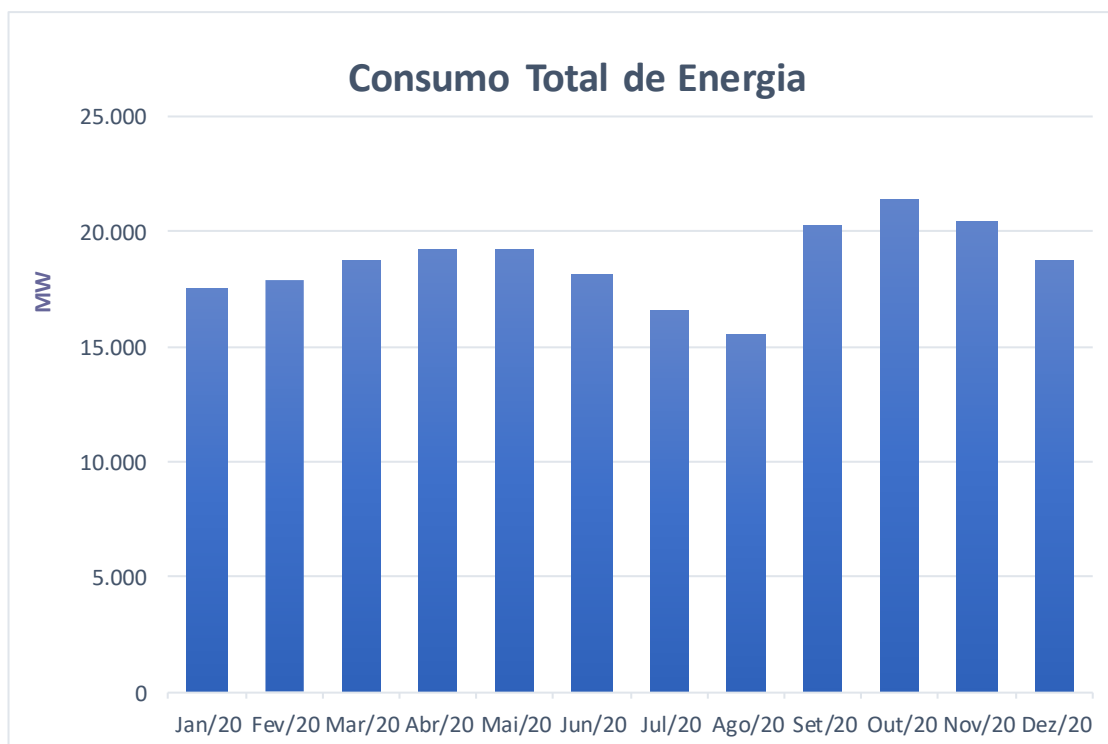


Figura 5.19 Consumo total de energia da célula eletrolítica mercúrio no ano de 2020.

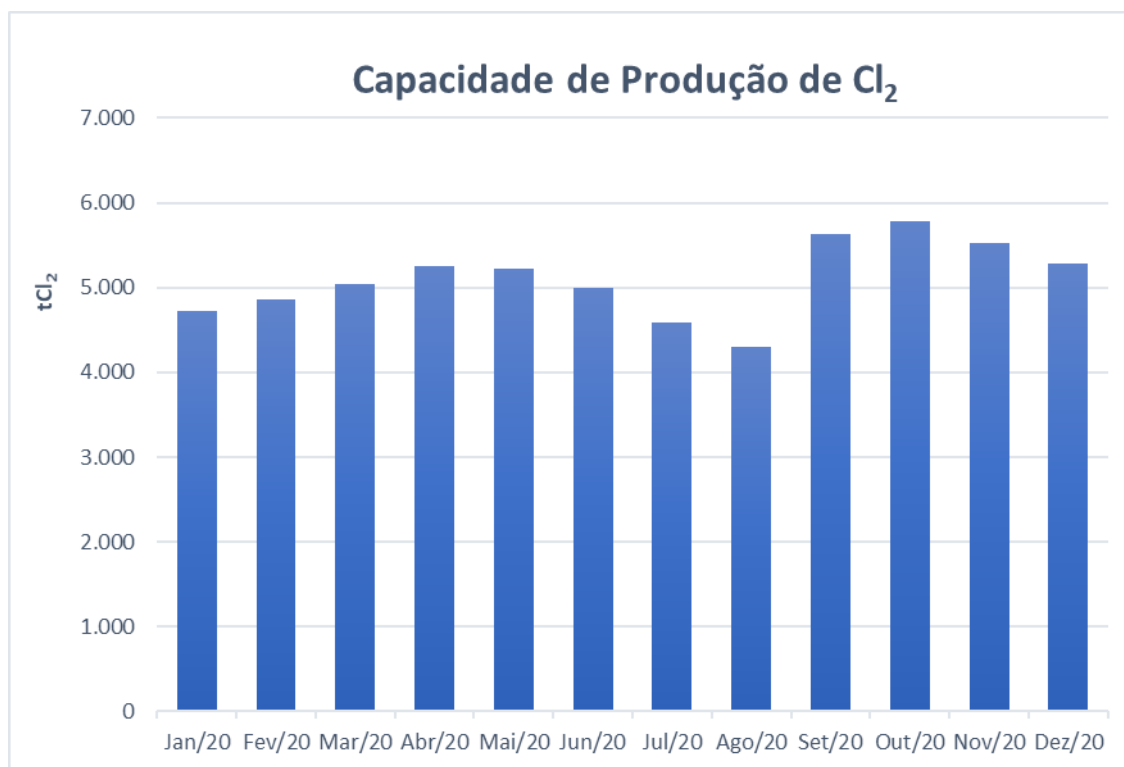


Figura 5.20 Capacidade de produção de CL₂ no ano de 2020 da sala de células mercúrio.

5.8 Consumo energético da célula eletrolítica membrana

Conforme levantamento de dados realizado no ano de 2020, seguem os gráficos apresentando a carga média, tensão média por célula consumo total de energia (MW), eficiência (%) e capacidade de produção de Cl_2 , da sala de células eletrolíticas membrana.

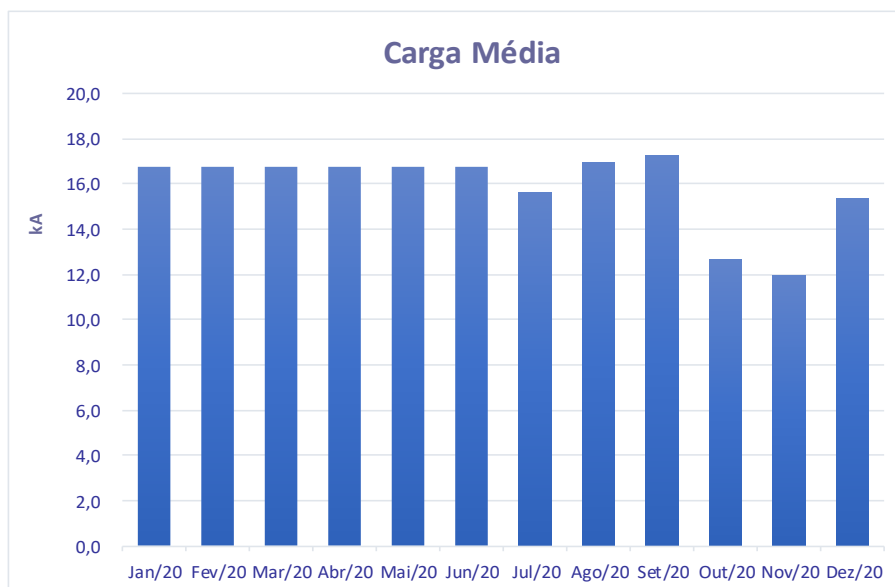


Figura 5.21 Carga média em (kA) da sala de células membrana no ano de 2020.

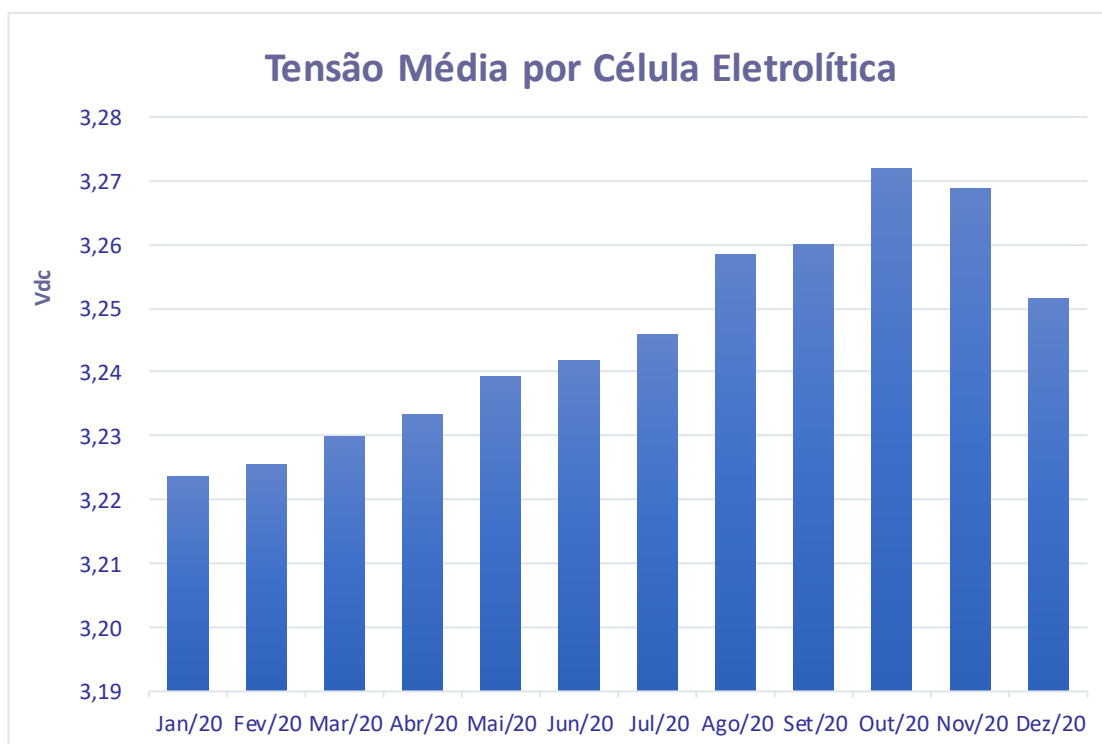


Figura 5.22 Tensão média por célula eletrolítica da sala de células membrana no ano de 2020.

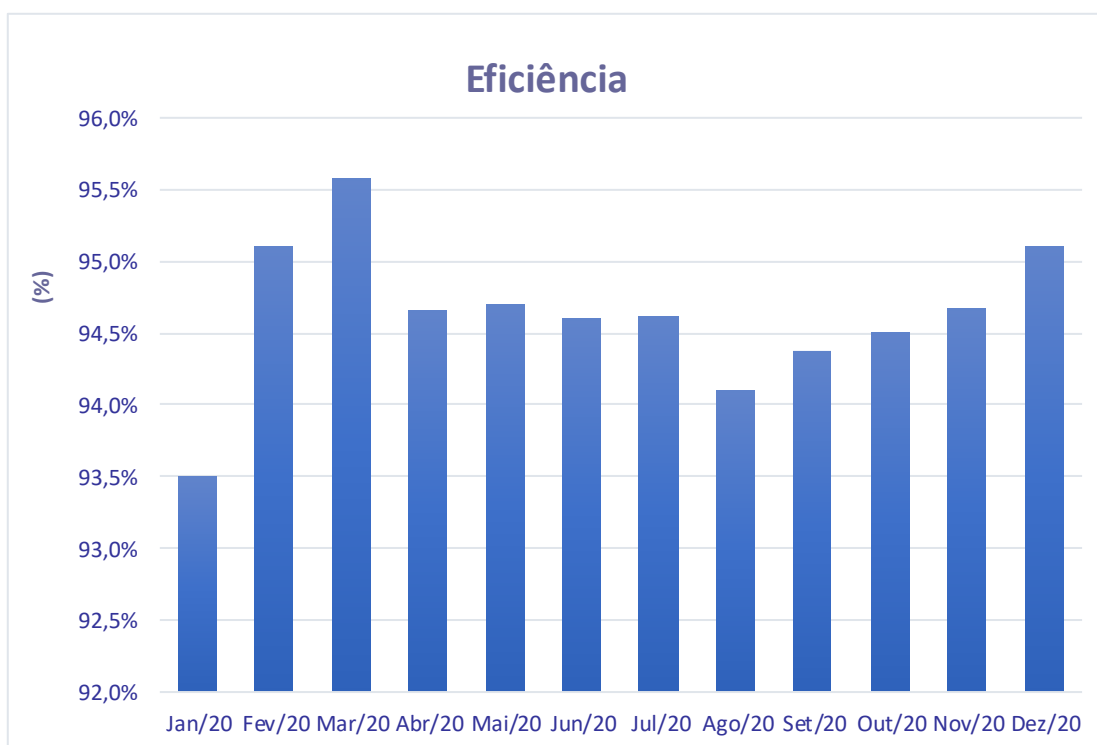


Figura 5.23 Eficiência da célula eletrolítica membrana no ano de 2020.

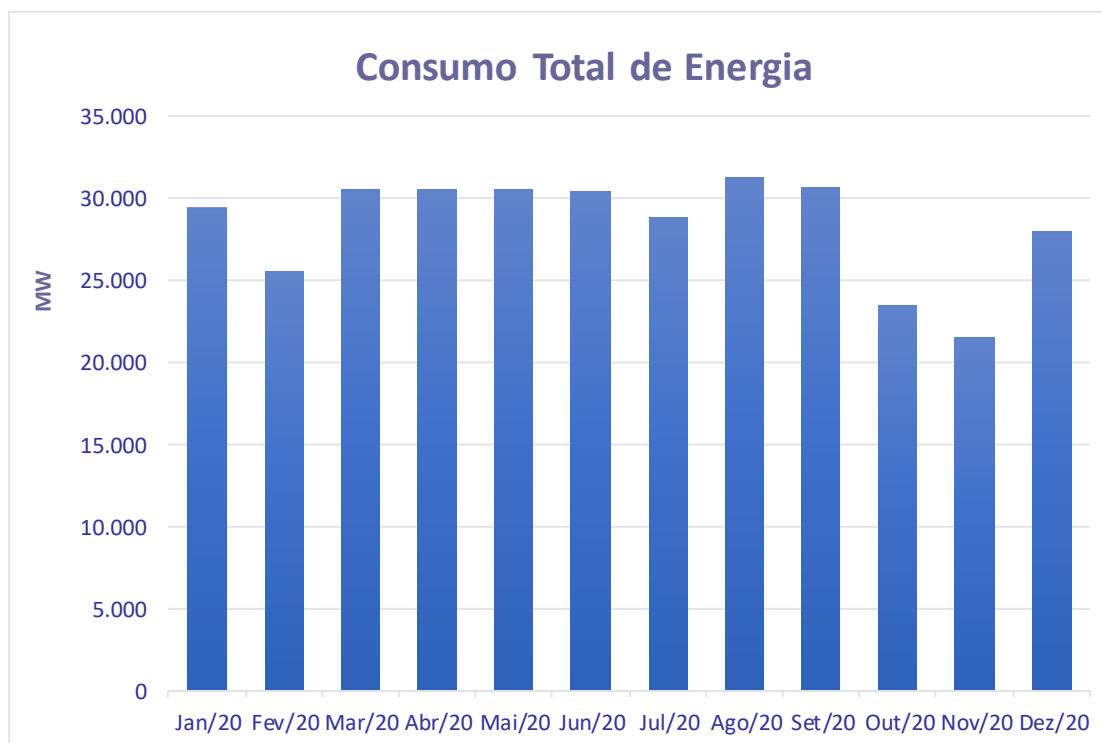


Figura 5.24 Consumo total de energia da célula eletrolítica membrana no ano de 2020.

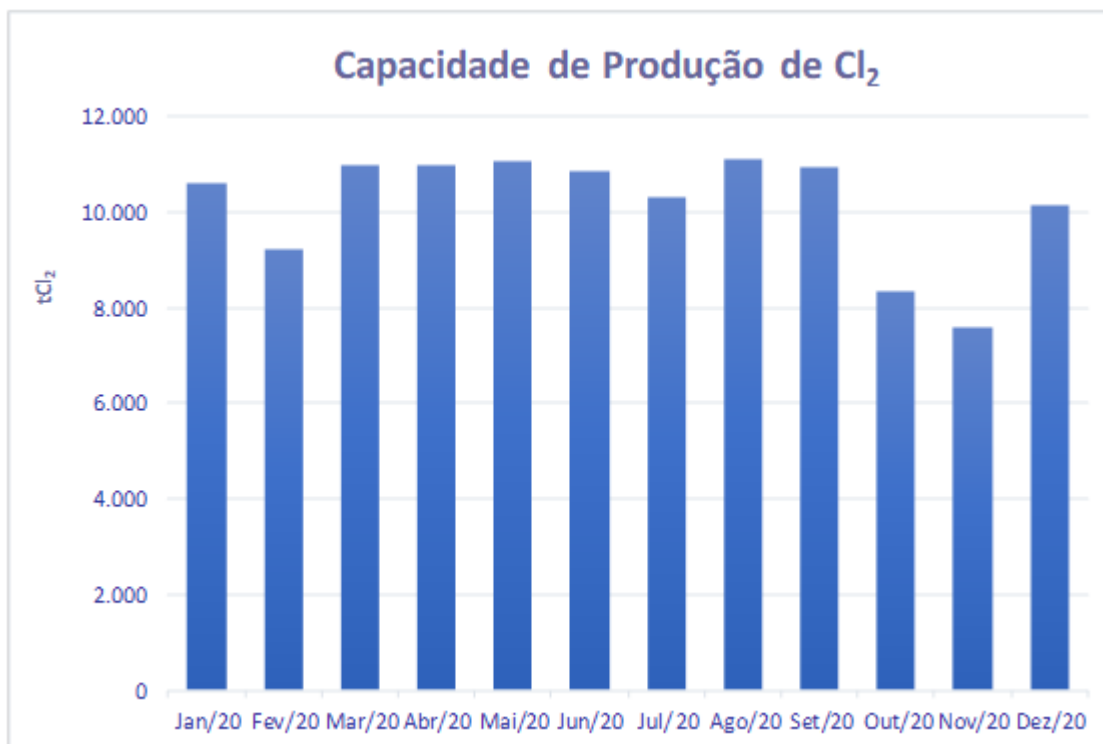


Figura 5.25 Capacidade de produção de CL₂ no ano de 2020 da sala de células membrana.

6.CONCLUSÕES

Com relação a avaliação das células eletrolíticas diafragma temos as seguintes considerações:

Células diafragma amianto catodo MDC-55, apresenta a melhor eficiência entre as células diafragma e um consumo específico em DCkWh/tCl_2 equivalente ao da célula diafragma PMX catodo BP-66. A célula diafragma PMX catodo BP-66 possui a maior área anódica das três células eletrolíticas diafragma.

A maior capacidade de produção de cloro é das células diafragma amianto catodo MDC-55 em relação as células diafragma, conseqüentemente apresenta o maior consumo total de energia, em virtude principalmente da redução das manutenções e interrupções na eletrólise.

Todas as células diafragma amianto catodo MDC-55, estão desativadas do processo de eletrólise, portanto somente as células diafragma PMX catodo MDC-55 e BP-66 encontram-se em operação.

A tensão de célula possui relação direta com a quantidade de energia consumida, indicando que qualquer redução nesse valor gera uma economia substancial. Partindo de eletrólises num sistema análogo ao industrial, podendo alcançar reduções significativas na tensão da célula.

Das três tecnologias utilizadas para a produção do cloro-soda, a célula eletrolítica mercúrio apresenta o maior consumo de energia total, seguido da tecnologia diafragma e membrana.

O processo de membrana apresenta as maiores vantagens em relação aos demais, pois exige menor investimento, oferece maior flexibilidade em termos de dimensionamento da capacidade e menor custo de produção (em decorrência do menor consumo energético), além de ser um processo "limpo". A única desvantagem é a exigência de matéria-prima (salmoura) de elevada pureza.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] _____. NBR IEC 60085:2017 - Isolação elétrica - Avaliação e designação térmicas Norma Brasileira. Rio de Janeiro, 2017.
- [2] ABICLOR Associação Brasileira da Indústria de Álcalis, Cloro de Derivados. Disponível em: <<http://www.abiclor.com.br/cloro>> Acesso em: 10 abr. 2021.
- [3] "ALCOA Aluminium Bus Conductor Handbook", Aluminium Company of America, 1957.
- [4] "Aluminium Electrical Conductor Handbook", The Aluminium Association. Second Ed. 1984.
- [5] A.G. Thomas, and P.J.H.Rata, "Aluminium Busbar", Bush House Ed., London, 1971.
- [6] A.G. Thomas, and "Cooper for Busbar", Bush Housde ED., London, 1971.
- [7] ANDRADE, J. E. P. e ZAPORSKI, J. A indústria de cloro-soda. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 183-226, 1994.
- [8] BARBI, I. Eletrônica de Potência. Florianópolis. Editora da UFSC, 1986.
- [9] BARROS, B. F. & GEDRA, R. L. Cabine Primária: Subestações de Alta Tensão de Consumidor. Editora Érica. São Paulo, 2015.
- [10] BRAGA, J. M. F. Análise da viabilidade econômica da integração de sistemas de célula a combustível, nas plantas de cloro-soda, para utilização do hidrogênio gerado no processo. 2009. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [11] CAUFRIEZ, A "Fundamentos de Eletroquímica", Prentice Hall Ed.,1999.
- [12] DEWAN, S. B. SLEMON, G. R. STRAUGHEN, A. Power Semiconductor Drivers. New York. John Wiley and sons, 1984.
- [13] FERNANDES, E.; GLÓRIA, A. M. S.; GUIMARÃES, B. A. O setor de cloro-soda no Brasil e no mundo. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 279-320, 2009.
- [14] GALLONE, P., Trattato di Ingegneria Elettrochimica, Tamburini Edotore, Milano, 1973.
- [15] HINE, F. Electrode Processes and Electrochemical Engineering. Plenum Press, New York, 1985.

- [16] JÚNIOR, Roberto N. J. : Modelagem Matemática de um processo industrial de produção de cloro e soda por eletrólise de salmoura visando sua otimização, Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, Brasil, 2006.
- [17] KAGAN, N. *et al.* Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Editora Blucher. São Paulo, 2010.
- [18] KAUFMANN, Dale W.: Sodium Chloride – The Production and properties of Salt of Brine, Reinhold Publishing Corporation, London, 1960.
- [19] KNOWLTON, A.E. Standard Handbook for Eletrical Engineers, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1941
- [20] MAMEDE FILHO, J. “Manual de Equipamentos Elétricos”. Editora de Livros Técnicos Científicos, Vol.1, 3ª edição, Rio de Janeiro, 2005.
- [21] M. Santos, “Motores Principais do Laminador de Blocos – Dimensionamento dos Barramentos” . Relatório Técnico Açominas/EPC, 1979.
- [22] M. Santos, “Considerações no Dimensionamento dos Barramentos”, Relatório Técnico EPC, 1979.
- [23] PAICE, D. A. Power Electronic Converter Harmonic Multipulse Methods for Clean Power. New York. IEEE Press, 1996.
- [24] PELLY, B. R. Thyristor phase controlled converters and cycloconverters. New York. Wiley Intersciency, 1971.
- [25] PERRY, J.H., Chemical Engineers Handbook, 3ª Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1950.
- [26] PETRUZELLA, F. D. Motores Elétricos e Acionamentos. Editora McGraw-Hill. São Paulo, 2013.
- [27] PINTO, Maxwell F.: Estudo de Retificadores de Alta Potência para Eletrólise, Dissertação de mestrado, UFMG, Minas Gerais, Brasil, 2005.
- [28] SCHAEFER, J. Rectifier circuits: theory and design. Norwalk. John Wiley and sons, 1965.

[29] SIEMENS, Cubículos de média tensão isolados a Ar tipo NXAIR, NXAIR M e NXAIR P, até 24kV. Jundiaí, p.28.2011.

[30] SIEMENS - Caderno de Desenhos - SIMOSEC: Cubículo com Dispositivos de Secionamento (Chaves e Disjuntores) Isolados em SF6 - Cabine Padrão Light. São Paulo, 2018.

[31] SINGH, Bhim; GAIROLA, Sanjay – Pulse Doubling in 18-Pulse AC-DC Converters. In: IEEE Power Electronics and Drive Systems, IEEE, 2007.

[32] WALSH, F. A., First Course in Electrochemical Engineering, The Electrochemical Consultancy Ed., Chichester, 1993, p.381