

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS



Fonte: (KASTERBRASIL, 2018)

SEGMENTO QUÍMICO

14.09.2018

Pesquisa/Produto/Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – Bird, em 1º de março de 2012.

Elaborado por:

Consultor Sênior: Márcio Koerich

Consultor Júnior: Jéssica Pereira Santiago

Estatístico: Teresa Aparicio Villegas

Coordenador do Projeto: Fernando Moreno Pinzón

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. PERFIL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE QUÍMICA	12
2.A. COMPORTAMENTO DA PRODUÇÃO EM NÍVEL DE SUBSEGMENTO E SUAS TENDÊNCIAS	12
2.a.1. Subsegmento de Soda-Cloro	15
2.a.2. Subsegmento Petroquímica	19
2.a.3. Subsegmento Fertilizantes	24
2.a.4. Subsegmento Alcoolquímica	30
2.a.5. Subsegmento Gás-Química.....	32
2.B. INFORMAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NO SEGMENTO DE QUÍMICA E SUA PARTICIPAÇÃO NA DEMANDA INDUSTRIAL.....	33
2.C. INDICADORES QUE SERÃO QUANTIFICADOS A PARTIR DA ANÁLISE DA REALIDADE BRASILEIRA ATUAL	37
3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL.....	39
3.A. PROCESSOS DE PRODUÇÃO PRINCIPAIS DO SUBSEGMENTO SODA-CLORO	39
3.a.1. Tecnologia Diafragma	40
3.a.3. Tecnologia Mercúrio	42
3.B. PROCESSOS DE PRODUÇÃO PRINCIPAIS DO SUBSEGMENTO PETROQUÍMICO	43
3.C. PROCESSOS DE PRODUÇÃO PRINCIPAIS DO SUBSEGMENTO FERTILIZANTES	44
3.c.1. Amônia.....	44
3.c.2. Uréia	46
3.c.3. Nitrato de amônio.....	48
3.c.4. Sulfato de amônio	49
3.c.5. Fosfato de diamônio (DAP) e Fosfato de monoamônio (MAP)	50
3.c.6. Superfosfato simples (SSP).....	52
3.c.7. Superfosfato triplo (TSP).....	53
3.c.8. Cloreto de potássio.....	54
3.D. PROCESSOS DE PRODUÇÃO PRINCIPAIS DO SUBSEGMENTO ALCOOLQUÍMICO.	55
3.d.1. Eteno	55
3.d.2. Acetato de etila.....	57

3.d.3. Acetaldeído.....	57
3.d.4. Ácido Acético.....	59
3.d.5. Butanol.....	60
3.E. PROCESSOS DE PRODUÇÃO PRINCIPAIS DO SUBSEGMENTO GÁS-QUÍMICA.....	60
3.e.1. Eteno.....	61
3.e.2. Gás de síntese e Hidrogênio.....	62
4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO.....	64
4.A. SELEÇÃO DA AMOSTRA DA PESQUISA.....	64
4.B. SELEÇÃO DAS ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	64
4.C. TRATAMENTO DE DADOS.....	65
5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO.....	66
5.A. SUBSEGMENTO SODA-CLORO.....	66
5.a.i. Situação atual.....	66
5.a.2. Situação com tecnologias mais eficientes.....	73
5.B. SUBSEGMENTO PETROQUÍMICA.....	80
5.b.1. Situação atual.....	80
5.b.2. Situação com tecnologias mais eficientes.....	84
5.C. SUBSEGMENTO FERTILIZANTES.....	91
5.c.1. Situação atual.....	91
5.c.2. Situação com tecnologias mais eficientes.....	95
5.D. SUBSEGMENTO ALCOOLQUÍMICA.....	101
5.d.1. Situação atual.....	101
5.d.2. Situação com tecnologias mais eficientes.....	104
5.E. SUBSEGMENTO GÁS-QUÍMICA.....	108
5.e.1. Situação atual.....	108
5.e.2. Situação com tecnologias mais eficientes.....	112
6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETREÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO.....	118
6.A. SUBSEGMENTO SODA-CLORO.....	119
6.B. SUBSEGMENTO PETROQUÍMICA E GÁS-QUÍMICA.....	119
6.C. SUBSEGMENTO FERTILIZANTES.....	120

6.D. SUBSEGMENTO ALCOOLQUÍMICA	120
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	121
8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS.....	124

Lista de tabelas

Tabela 1 - Ranking Mundial Faturamento Líquido da Indústria Química - US\$ Bilhão	12
Tabela 2 - Faturamento dos subsegmentos indústria química em 2016	13
Tabela 3 - Dados de produção e faturamento setor fertilizantes anos 2016 e 2017	25
Tabela 4 - Capacidade instalada de fertilizantes nitrogenados no Brasil em 2017	26
Tabela 5 - Capacidade instalada de fertilizantes fosfatados no Brasil em 2017	28
Tabela 6 - Capacidade instalada de fertilizantes potássicos no Brasil em 2017	29
Tabela 7 - Capacidade instalada dos derivados de etanol no Brasil em 2017.....	31
Tabela 8 - Consumo específico de energia por valor agregado (PIB).....	35
Tabela 9 - Lista de ações para aumento na eficiência energética na indústria	37
Tabela 10 - Rendimento energético atual, subsegmento de soda-cloro	68
Tabela 11 - Fator COP e Carnot do ciclo de Carnot ideal, ciclo teórico e os sistemas de refrigeração disponíveis em diferentes aplicações.....	69
Tabela 12 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento de soda-cloro	70
Tabela 13 – Custo estimado para implementação de uma planta produtora de 500 toneladas de cloro por dia tecnologia diafragma (10 ⁶ \$ 1990).....	72
Tabela 14 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de soda-cloro.....	73
Tabela 15 - Rendimento energético alternativo, subsegmento de soda-cloro	76
Tabela 16 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento de soda-cloro.....	77
Tabela 17 - Investimento na situação melhorada - soda-cloro	77
Tabela 18 - Eficiência energética em motores elétricos	79
Tabela 19 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento soda-cloro	79
Tabela 20 - Rendimento energético atual, subsegmento petroquímico	83
Tabela 21 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento petroquímico.....	83
Tabela 22 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de petroquímicos .	85
Tabela 23 - Rendimento energético alternativo, subsegmento petroquímico	88
Tabela 24 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento petroquímico.....	88

Tabela 25 - Investimento na situação melhorada - Petroquímica	89
Tabela 26 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento petroquímico ..	91
Tabela 27 - Rendimento energético atual, subsegmento fertilizantes	94
Tabela 28 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento fertilizantes	94
Tabela 29 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de fertilizantes	95
Tabela 30 - Rendimento energético alternativo, subsegmento fertilizantes	98
Tabela 31 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento fertilizantes	98
Tabela 32 - Investimento na situação melhorada - fertilizantes	99
Tabela 33 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento de fertilizantes	100
Tabela 34 - Rendimento energético atual, subsegmento álcoolquímica	103
Tabela 35 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento álcoolquímica	103
Tabela 36 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de álcoolquímica	104
Tabela 37 - Rendimento energético alternativo, subsegmento álcoolquímica	106
Tabela 38 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento álcoolquímica	106
Tabela 39 - Investimento na situação melhorada - álcoolquímica	107
Tabela 40 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento álcoolquímica	108
Tabela 41 - Rendimento energético atual, subsegmento gás-químico	111
Tabela 42 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento gás-químico	111
Tabela 43 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento gás-químico	112
Tabela 44 - Rendimento energético alternativo, subsegmento gás-químico	115
Tabela 45 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento gás-químico	115
Tabela 46 - Investimento na situação melhorada da indústria gás-químico	116
Tabela 47 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento gás-químico	117
Tabela 48 - Medidas de melhoria na eficiência energética geral, segmento químico	122

Lista de figuras

Figura 1 - Distribuição das plantas de produtos químicos de uso industrial	13
Figura 2 - Cadeia produtiva da indústria de cloro-álcalis	15
Figura 3 - A indústria petroquímica no Brasil.....	19
Figura 4 – Rendimento de co-produtos na produção de eteno via diferentes matérias-primas .	22
Figura 5 - Diagrama de blocos do processo de obtenção de soda-cloro	39
Figura 6 – Célula eletrolítica tecnologia diafragma.....	41
Figura 7 - Célula eletrolítica tecnologia membrana	42
Figura 8 - Célula eletrolítica tecnologia mercúrio	43
Figura 9 - Diagrama de blocos do processo de produção de amônia por reforma a vapor do gás natural	45
Figura 10 - Diagrama de blocos do processo de produção de ureia.....	47
Figura 11 - Diagrama de blocos do processo de produção de nitrato de amônio	48
Figura 12 - Diagrama de blocos do processo de produção de sulfato de amônio a partir de ácido sulfúrico residual.....	49
Figura 13 - Diagrama de blocos do processo de produção de sulfato de amônio a partir de gás de coque.....	50
Figura 14 - Diagrama de blocos do processo de MAP / DAP granulado.....	51
Figura 15 - Diagrama de blocos do processo de produção de SSP granulado	52
Figura 16 - Diagrama de blocos do processo de produção de TSP granulado	53
Figura 17 -Diagrama de blocos do processo de produção de cloreto de potássio.....	54
Figura 18 -Diagrama de blocos da produção de eteno a partir da desidratção do etanol	56
Figura 19 - Diagrama de blocos da produção de acetato de etila a partir do etanol	57
Figura 20 - Diagrama de blocos da produção de acetaldeído a partir da oxidação do etanol....	58
Figura 21 - Diagrama de blocos da produção de ácido acético a partir da oxidação do acetaldeído.....	59
Figura 22 - Diagrama de blocos da produção de butanol	60

Figura 23 – Diagrama de blocos da produção de eteno via craqueamento a vapor a partir de etano e propano	61
Figura 24 - Diagrama de blocos da produção de hidrogênio	63
Figura 25 – Principais etapas de produção de soda-cloro no cenário atual	66
Figura 26 - Principais etapas de produção dos produtos petroquímicos básicos no cenário atual	80
Figura 27 - Principais etapas de produção de fertilizantes básicos no cenário atual	92
Figura 28 - Principais etapas de produção de álcoolquímica no cenário atual	101
Figura 29 - Principais etapas de produção de gás-químicos no cenário atual.....	108

Lista de gráficos

Gráfico 1 - Distribuição do uso de tecnologia produção de cloro	16
Gráfico 2 - Evolução da taxa de utilização das plantas de cloro.....	17
Gráfico 3 - Gráfico de índice de custo de energia elétrica nas empresas associadas da Abiclor	17
Gráfico 4 – Evolução de produção do setor cloro-álcalis.....	18
Gráfico 5 - Evolução da capacidade instalada de soda cáustica por tecnologia	18
Gráfico 6 - Evolução da capacidade instalada de cloro por tecnologia.....	19
Gráfico 7 - Balança comercial de petroquímicos básicos.....	20
Gráfico 8 - Perfil de produção anual do subsegmento petroquímico	21
Gráfico 9 - Importação e exportação de benzeno	23
Gráfico 10 - Importação e Exportação de p-xileno.....	24
Gráfico 11 - Principais países produtores de fertilizantes nitrogenados	26
Gráfico 12 - Perfil de produção anual de fertilizantes nitrogenados, subsegmento fertilizantes	27
Gráfico 13 - Principais países produtores de fertilizantes fosfatados	28
Gráfico 14 - Principais países produtores de cloreto de potássio	29
Gráfico 15 -Perfil de produção anual de acetato de éteres e de alcoois, subsegmento alcoolquímica.....	30
Gráfico 16 – Consumo energético dos subsegmentos do setor industrial referente a 2016	33
Gráfico 17 - Consumo energético final por setor (%).....	34
Gráfico 18 - Distribuição do consumo energético na indústria química por fonte energética	35
Gráfico 19 -Gráfico do consumo específico de energia por valor agregado e análise de tendência	36
Gráfico 20 – Consumo energético do subsegmento de soda-cloro.....	67
Gráfico 21 - Consumo energético do subsegmento petroquímico	81
Gráfico 22 - Consumo energético do subsegmento fertilizantes	93
Gráfico 23 - Consumo energético do subsegmento de alcoolquímica.....	102
Gráfico 24 - Consumo energético do subsegmento gás-químico	110

Lista de equações

Equação 1 – Cálculo do COP potencial	70
Equação 2 – Cálculo de conversão de unidade.....	70
Equação 3 – Cálculo do rendimento potencial de refrigeração	70
Equação 4 – Cálculo da quantidade de combustível utilizado.....	71
Equação 5 – Estimativa de custo de motores	72

1. INTRODUÇÃO

Descrição geral do objetivo do relatório

O presente relatório tem como objetivo identificar e avaliar a eficiência energética nas indústrias da cadeia de produção química, assim como a geração de dados básicos relativos ao uso de energia (elétrica e térmica) através da realização de pesquisa em âmbito nacional.

O estudo, inicialmente, caracteriza este segmento sob os pontos de vista técnico, econômico, energético e ambiental e, em seguida, é mostrada a metodologia utilizada para o cálculo dos potenciais de conservação de energia e comparados os resultados com os encontrados na literatura técnica. São comentadas, por fim, algumas barreiras existentes para as ações de conservação de energia na indústria da cadeia de produção de químicos.

Abrangência deste relatório

Este trabalho destina-se em particular à EPE e ao MME, contribuindo para o aprimoramento das atividades de planejamento e para as pesquisas no âmbito do setor industrial.

O alcance deste estudo no segmento químico, está definido para os seguintes subsegmentos: soda-cloro, petroquímico, fertilizantes, álcoolquímico e gás-químico.

O estudo aborda os seguintes temas específicos:

- Descrição do processo produtivo de cada subsegmento;
- Consumo de energia no segmento químico e sua participação na demanda industrial;
- Consumo de energia de cada subsegmento e sua distribuição fonte-uso;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento nas condições da situação atual de produção;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento considerando a utilização de tecnologias mais eficientes;
- Análises dos condicionantes de penetração de tecnologias eficientes de energia por subsegmento;
- Conclusões gerais do estudo.

2. PERFIL DA INDÚSTRIA QUÍMICA BRASILEIRA

2.a. Comportamento da produção em nível de subsegmento e suas tendências

A indústria química brasileira ocupa a 8ª posição em faturamento líquido mundial em 2016, representando 2% do total mundial estimado em US\$ 5.197,6 bilhões (ABIQUIM, 2017).

Para efeito de comparação, em 2011 o Brasil figurava na 6ª posição, a frente de Índia e França e representava 3,1% do faturamento anual mundial (Tabela 1) (PwC, 2013).

PAIS	2011 [US\$ BILHÕES]	PAIS	2016 [US\$ BILHÕES]
China	1.286	China	1.907
Estados Unidos	759	Estados Unidos	768
Japão	382	Japão	262
Alemanha	261	Alemanha	236
Coreia	172	Coreia	166
Brasil	157	Índia	133
Índia	152	França	133
França	151	Brasil	109
Total	3.320	Total	3.714

Tabela 1 - Ranking Mundial Faturamento Líquido da Indústria Química - US\$ Bilhão

Fonte: (ABIQUIM, 2017; PwC, 2013)

Em 2017, a indústria química brasileira apresentou um faturamento líquido estimado de R\$ 379,3 bilhões, um aumento estimado de 1,2% sobre 2016. A participação da indústria química representou 2,4% do PIB industrial brasileiro em 2016 (ABIQUIM, 2017).

A indústria química brasileira apresenta 10,8% de participação sobre o PIB industrial brasileiro, a terceira maior contribuição no PIB industrial (ABIQUIM, 2017). Sendo intensiva em capital, matérias-primas e tecnologia.

Devido aos seus fortes efeitos de encadeamento para frente, é um dos setores de base da economia, ligando os demais setores, fornecendo-lhes uma diversificada gama de insumos e produtos.

Esse segmento industrial é subdividido conforme a Tabela 2, que também oferece dados de faturamento em 2016:

SEGMENTO	FATURAMENTO 2016 [US\$ BILHÕES]
Produtos Químicos de Uso Industrial	52,6
Produtos Farmacêuticos	14,4
Fertilizantes	8,6
Higiene Pessoal, perfumes e cosméticos	11,4
Produtos de Limpeza e Afins	6,6
Defensivos Agrícolas	9,6
Tintas, esmaltes e vernizes	3,4
Fibras sintéticas e artificiais	0,7
Outros	1,9
Total	109,2

Tabela 2 - Faturamento dos subsegmentos indústria química em 2016

Fonte: (ABIQUIM, 2017)

Para efeito deste estudo somente os segmentos de produtos químicos de uso industrial e fertilizantes compõe a população de amostragem, representando cerca de 56% do faturamento total da indústria química brasileira.

Dentro do universo de produtos químicos de uso industrial existe um total de 961 plantas cadastradas no Guia da Indústria Química Brasileira das quais mais de 85% estão localizadas na região sudeste do Brasil (ABIQUIM, 2017), e, portanto, próximas aos grandes centros consumidores. A distribuição das plantas industriais no Brasil pode ser observada na Figura 1.



Figura 1 - Distribuição das plantas de produtos químicos de uso industrial

Fonte: (ABIQUIM, 2017)

A demanda de produtos químicos nacionais de uso industrial teve um crescimento de 6% em 2017 em relação a demanda de 2016, de acordo com levantamento da ABIQUIM, feito através do CAN (Consumo Nacional Aparente). Segundo a mesma, o crescimento observado se deve ao fato da retomada das atividades econômicas de setores diretamente relacionados à indústria química, como a indústria automobilística, de construção civil, entre outras, que são clientes da indústria química (ABIQUIM b, 2018).

Entretanto, esse aumento de demanda vem sendo suprido cada vez mais por produtos químicos de uso industrial importados, que tiveram um aumento de 21,1% em 2017 comparado a 2016, representando 38% da demanda nacional, de acordo com informações da ABIQUIM. Por outro lado, as exportações tiveram uma leve queda, de -0,03% no mesmo período de tempo (ABIQUIM b, 2018).

O déficit comercial tende a ser exacerbado nos próximos anos, quando se considera as perspectivas de crescimento do país versus o nível de investimento no setor esperado para o futuro. No período de 2012 a 2016 foram investidos 11,6 bilhões de dólares, ao passo que o nível de investimento programado para o período 2017 a 2022 alcança apenas 3,3 bilhões de dólares (ABIQUIM, 2017).

Recentemente o CNPE (Conselho Nacional de Política Energética) finalizou a série de 12 reuniões específicas estabelecidas dentro do GT (Grupo de trabalho) de Refino e de petroquímica (PORTARIA MME, 2018).

Nestas reuniões foram discutidas ações de incentivo a investimentos nos setores de refino e de petroquímico com as seguintes entidades: Governos: ES, CE e MA; Petrobras; BNDES; Distribuidoras de Combustíveis; Operadores Logísticos do Downstream; Refinarias Riograndense, Manguinhos e Dax Oil; ABIQUIM; IBP; e Oil Group Refineries (PORTARIA MME, 2018).

Como resultado, 130 propostas foram contempladas e ao final dos trabalhos, 10 medidas de indução de investimento foram apresentadas ao CNPE (MME, 2018). Destas, as seguintes medidas oferecem incentivo direto ao aumento da capacidade instalada de petroquímicos no segmento químico brasileiro.

- Estimular a celebração de atos internacionais para atração de investimentos nos setores de refino e petroquímico;
- Considerar a produção de derivados em Zonas de Processamento de Exportação;
- Identificar e eliminar potenciais barreiras para implementação de unidades de refino e petroquímicos;
- Estimular o processamento de petróleo proveniente de bacias sedimentares terrestres em unidades de refino e de petroquímicos no país.

Em abril de 2018 estas medidas foram aprovadas pelo Ministro de Minas e Energia e encaminhadas à CASA CIVIL, responsável pela avaliação das propostas legislativas que são enviadas pelo chefe do executivo para o poder legislativo (MME, 2018).

2.a.1. Subsegmento de Soda-Cloro

A cadeia de soda-cloro (Figura 2), embora tenha uma variedade pequena de matérias-primas (água, sal e eletricidade), é encontrada em todos os setores da economia, sendo os produtos derivados dessa indústria de grande importância para as sociedades. Entre as aplicações dos produtos da indústria de cloro-álcalis, temos a presença no setor de saneamento básico, garantindo a desinfecção e potabilidade; produção de defensivos agrícolas; produção de latas de alumínio para refrigerantes e cervejas; entre outros (ABICLOR, 2014).

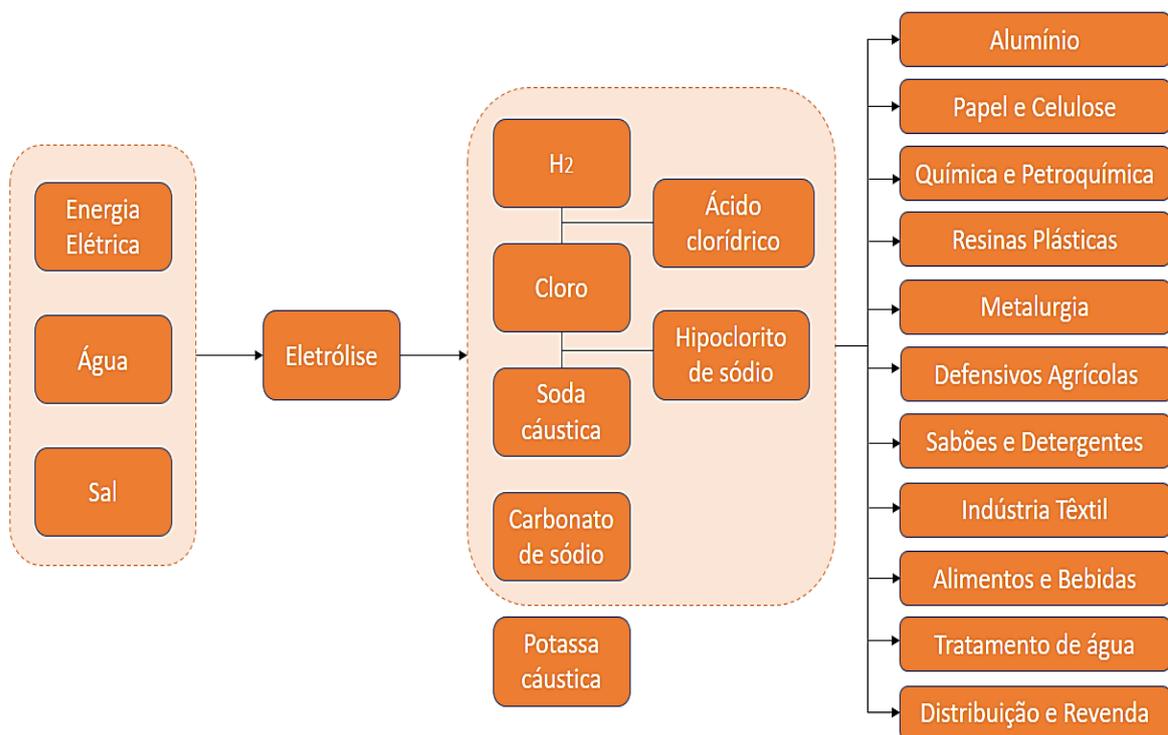


Figura 2 - Cadeia produtiva da indústria de cloro-álcalis

Fonte: (ABICLOR, 2014)

Atualmente no Brasil empregam-se três tipos de tecnologias no setor de cloro-álcalis, (células de mercúrio, de diafragma e de membrana) onde em todos os casos o produto é obtido nos eletrodos (ABICLOR, 2014).

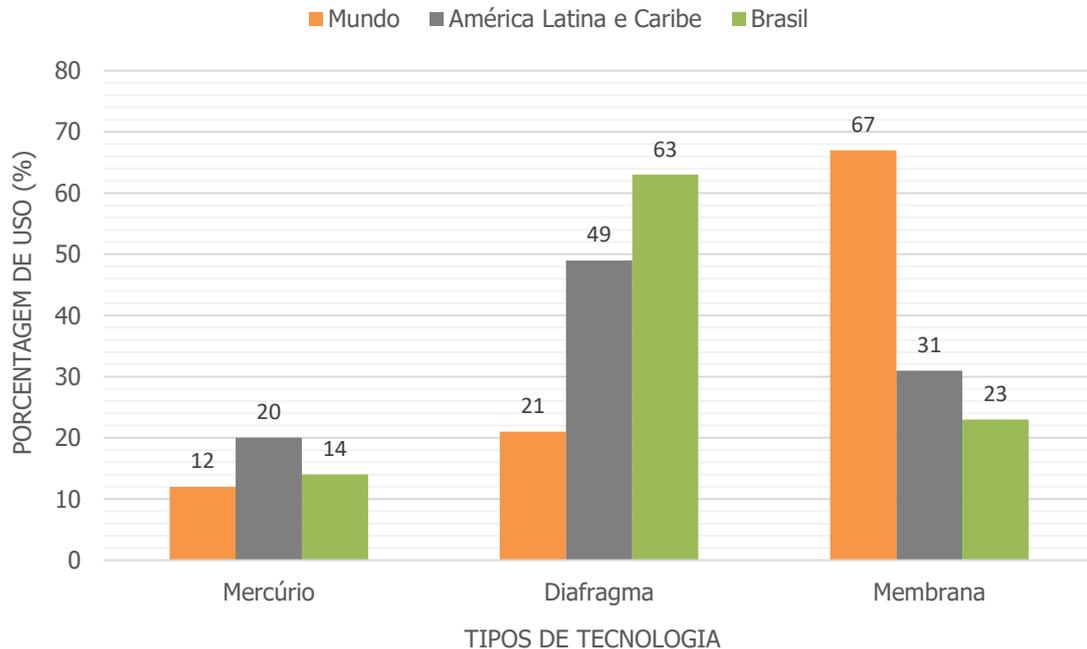


Gráfico 1 - Distribuição do uso de tecnologia produção de cloro

Fonte: (ABICLOR, 2014)

As empresas que mais se destacam no setor de soda-cloro brasileiro por representarem mais de 90% da capacidade instalada no país são a Braskem, a Dow Brasil, a Unipar Carbocloro e a Unipar Indupa (ABICLOR, 2014).

A taxa de utilização da capacidade instalada em 2017 foi de 76,8%, 2,2% menor do que o registrado em 2016. Não houve alteração do nível de capacidade instalada entre 2016 e 2017 (ABICLOR a, 2018)

Existe uma tendência na diminuição da taxa de utilização nos últimos anos, o que pode ser observado no Gráfico 2.

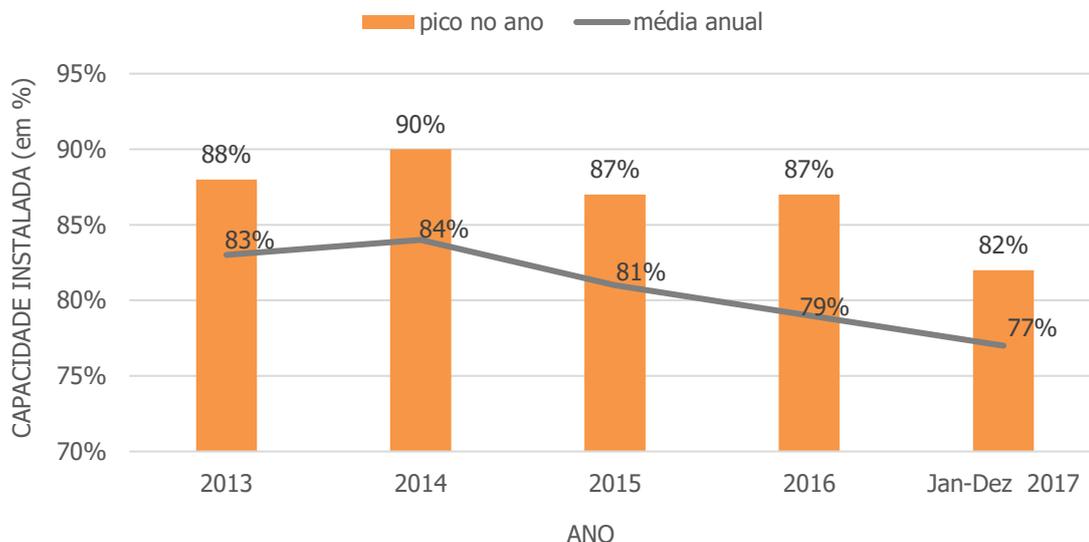
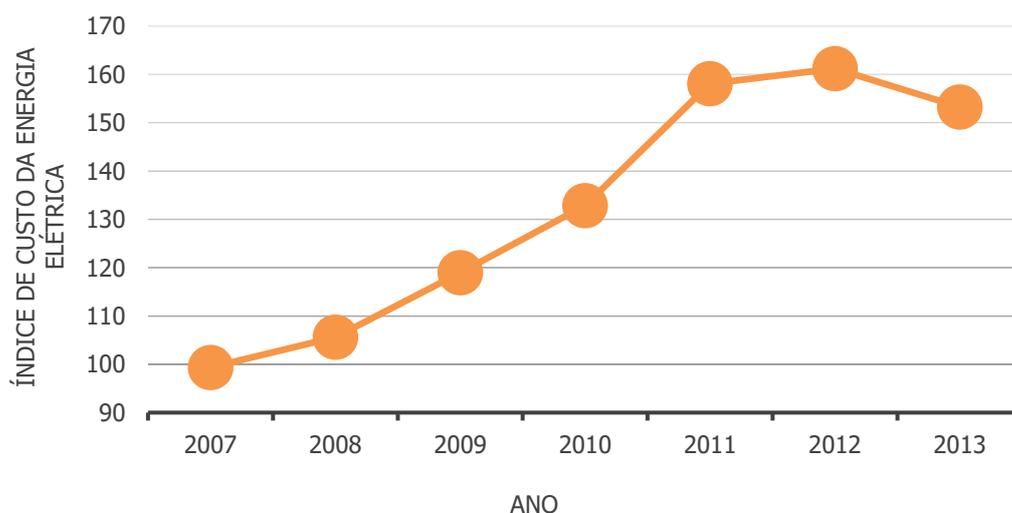


Gráfico 2 - Evolução da taxa de utilização das plantas de cloro

Fonte: (ABICLOR a, 2018)

Nesse segmento, o nível de importação aumentou em 2017 para 8.097 toneladas de cloro, uma variação de 34,8% maior do que 2016 (ABICLOR a, 2018).

Apesar da indústria cloro-álcalis ter reduzido em 10% o consumo específico de energia elétrica entre 2000 e 2013, o custo médio com energia elétrica cresceu 8,6% ao ano entre 2007 e 2013, superando em 3,1 pontos percentuais ao ano a taxa média de inflação de 5,5% conforme a variação do IPCA, como pode ser observado no Gráfico 3 (ABICLOR, 2014).



Número índice 2007 = 100

Gráfico 3 - Gráfico de índice de custo de energia elétrica nas empresas associadas da Abiclor

Fonte: (ABICLOR, 2014)

No Gráfico 4 pode-se observar a evolução de produção da cadeia produtiva da indústria cloro-álcalis.

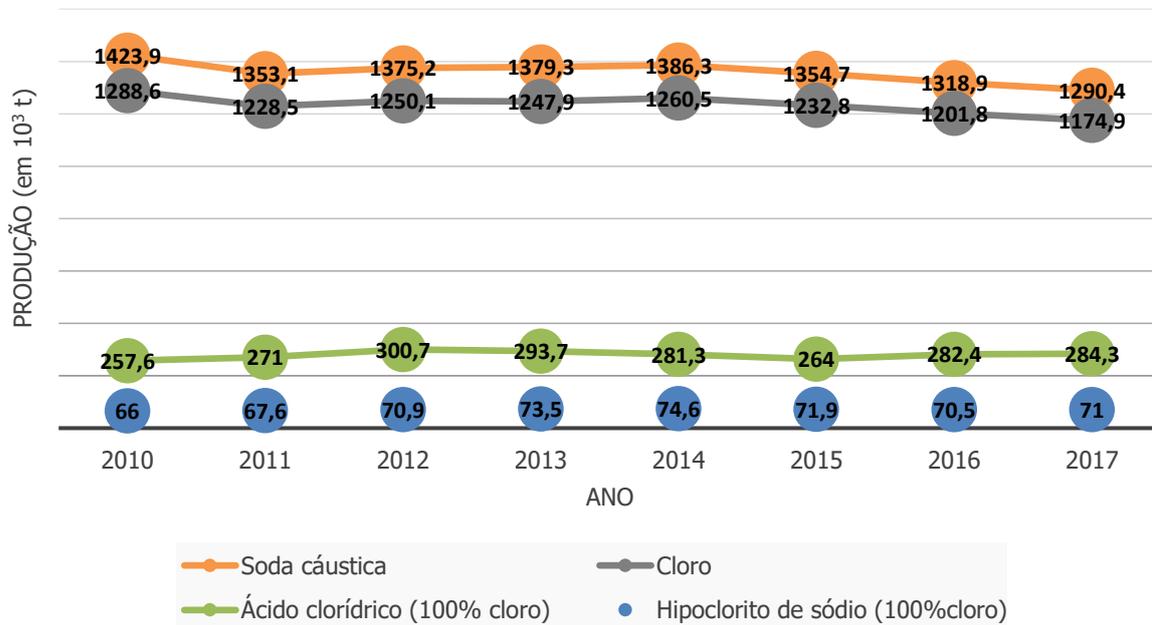


Gráfico 4 – Evolução de produção do setor cloro-álcalis

Fonte: (ABICLOR a, 2018)

Nos Gráficos 5 e 6 observar-se a evolução da capacidade instalada de soda cáustica e cloro, respectivamente, por tecnologia.

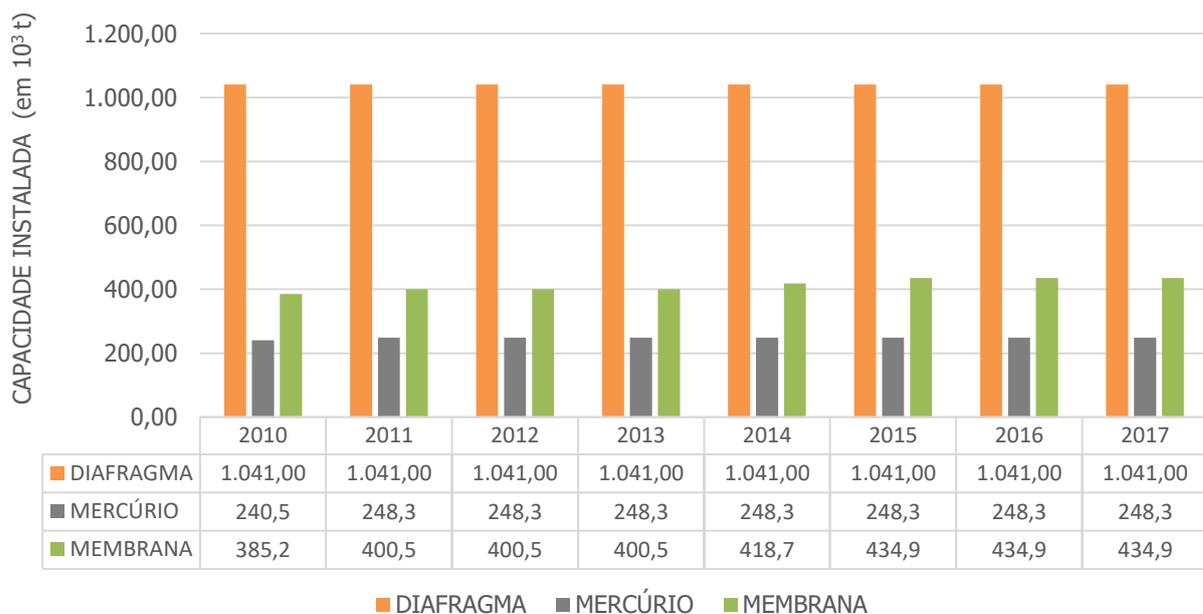


Gráfico 5 - Evolução da capacidade instalada de soda cáustica por tecnologia

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

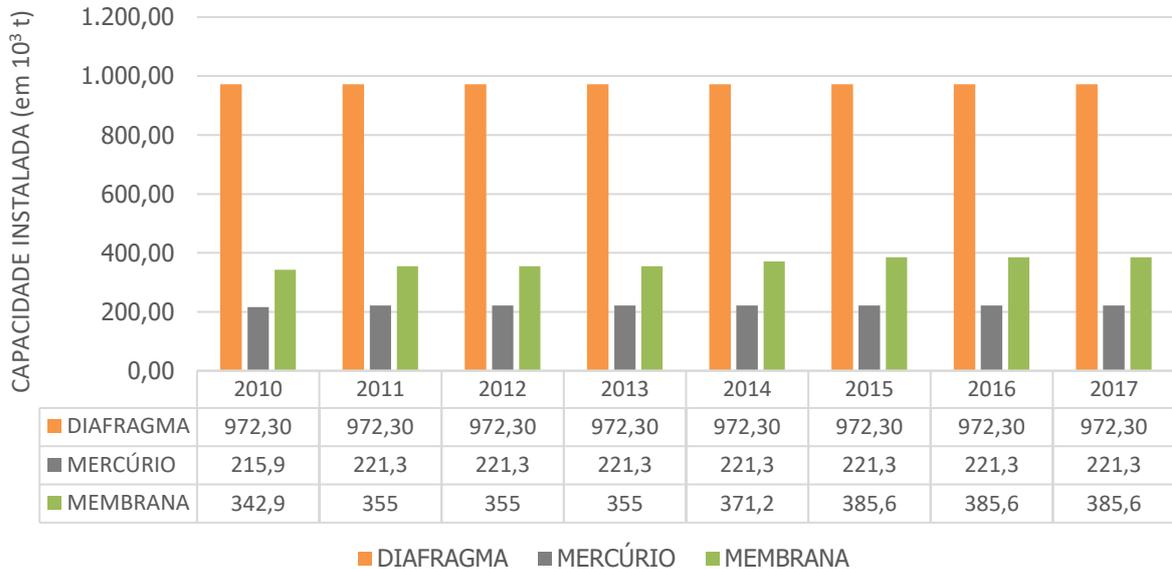


Gráfico 6 - Evolução da capacidade instalada de cloro por tecnologia
Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

2.a.2. Subsegmento Petroquímico

Em 2017 a indústria petroquímica (petroquímicos básicos) teve um faturamento líquido de 9,1 bilhões de dólares, representando pouco mais de 15% do total faturado pela indústria química de uso industrial (ABIQUIM, 2017).

Entre as matérias-primas utilizadas na indústria petroquímica nacional, temos principalmente a nafta (derivada do petróleo) e o carvão, que são obtidas da indústria de energia (BRASKEM a, 2018).

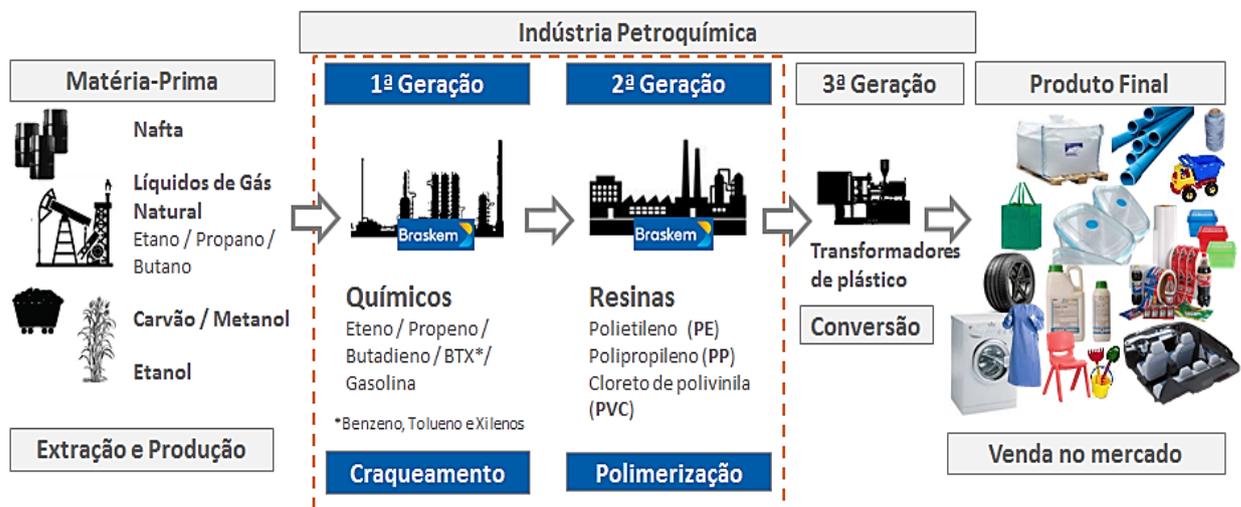


Figura 3 - A indústria petroquímica no Brasil
Fonte: (BRASKEM a, 2018)

De acordo com a Figura 3, no processo de produção, as matérias-primas passam primeiramente pela etapa de craqueamento, onde são produzidos vários petroquímicos básicos, seguida de etapa de polimerização desses petroquímicos que não foram vendidos a terceiros, transformando-os em resinas termoplásticas. As resinas termoplásticas passam pelo processo de conversão para produto final, feita pelos transformadores (BRASKEM a, 2018).

No Brasil não há significativo aumento de capacidade planejado no curto prazo. O único grande projeto no setor: o novo Polo Petroquímico COMPERJ no estado do Rio de Janeiro está paralisado aguardando desfecho de investigações do ministério público. Não há perspectivas no momento que se retomem as obras ou até mesmo se incluirá plantas de primeira e segunda gerações petroquímicas como anunciado originalmente (AGÊNCIA PETROBRÁS, 2018).

O principal fator pela falta de perspectivas para a indústria petroquímica é a indefinição quanto aos custos das matérias-primas (nafta e gás natural) e o seu suprimento. Dessa forma, no momento o que este segmento necessita é de parâmetros claros e adequados para começar a pensar em investimentos. Sem aumento na produção de insumos básicos (olefinas e aromáticos) é cada vez mais difícil planejar novos investimentos (QUÍMICA E DERIVADOS a, 2016).

No Gráfico 7 é apresentado o perfil histórico de importação e exportação dos produtos petroquímicos básicos, que mostra uma redução significativa na exportação, devido a competição causada pelo gás natural de xisto de baixo custo nos EUA. A inversão na tendência de importação pode ser explicada entre outros pela crise economia e política.

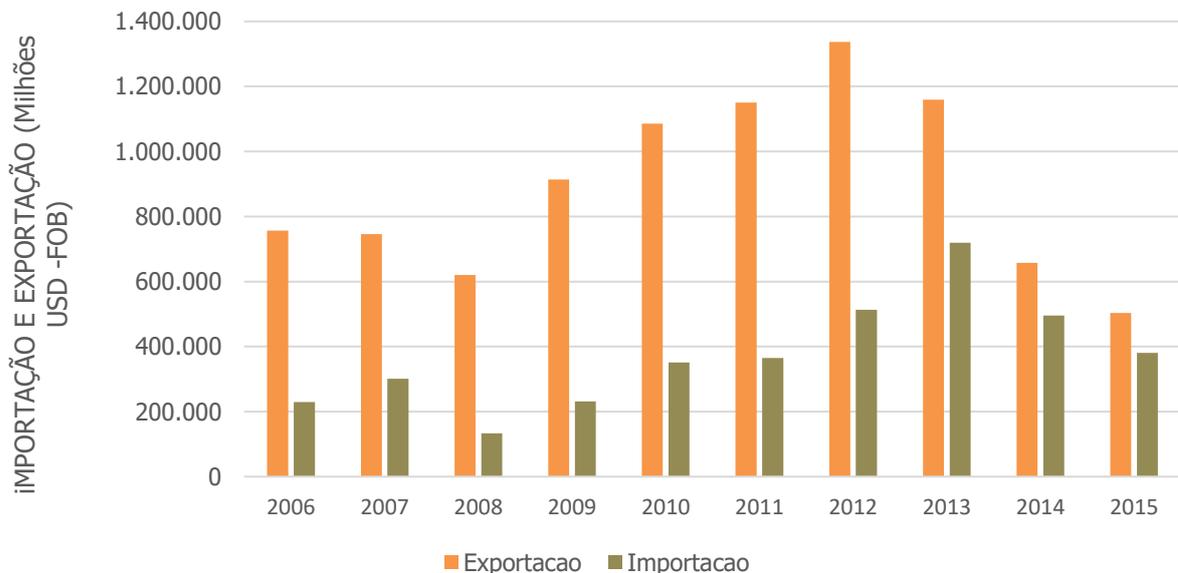


Gráfico 7 - Balança comercial de petroquímicos básicos

Fonte: (VIANA, 2017)

No Gráfico 8 pode-se observar a evolução da produção dos insumos petroquímicos básicos.

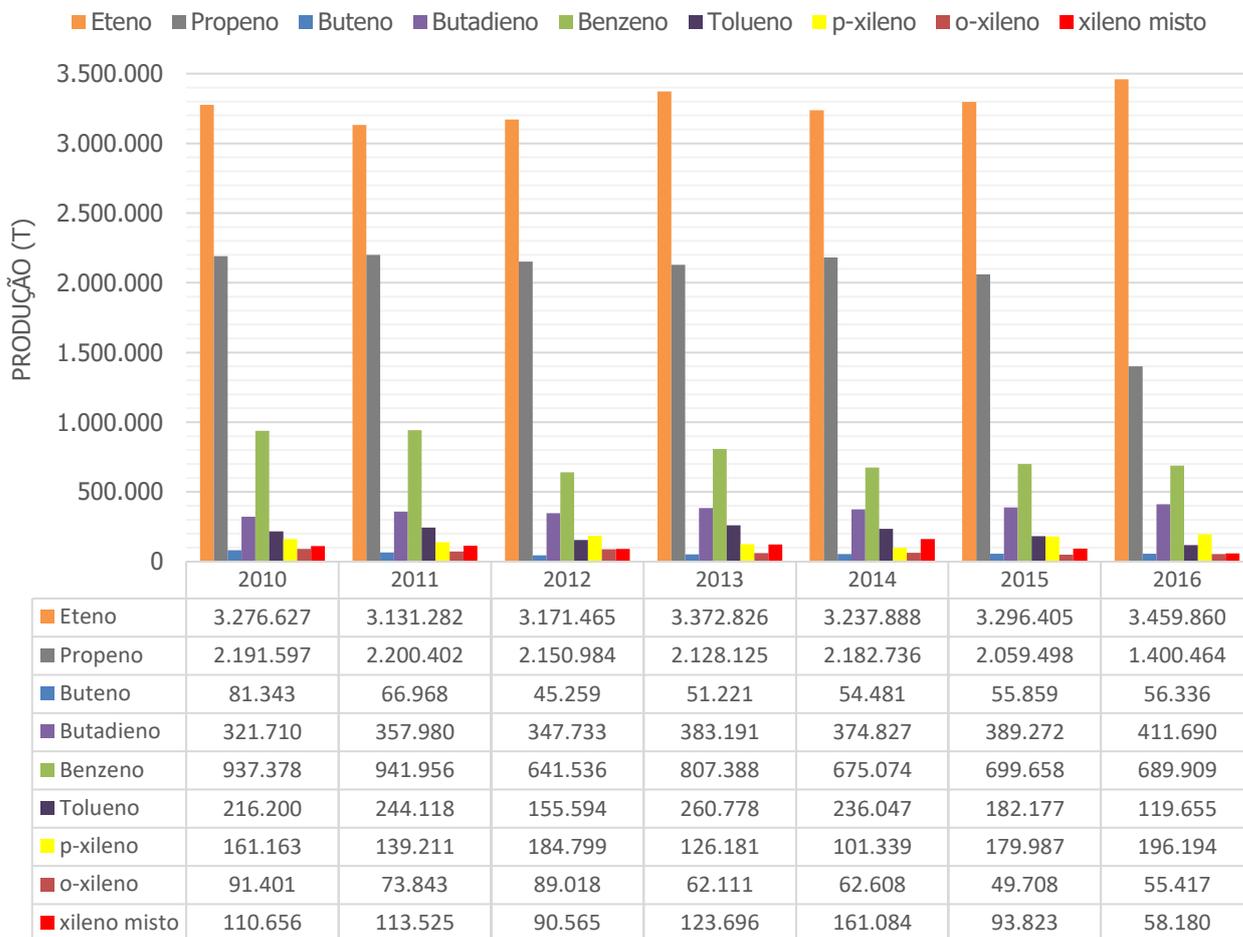


Gráfico 8 - Perfil de produção anual do subsegmento petroquímico

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

- Olefinas

As olefinas são importantes hidrocarbonetos da indústria petroquímica pois são utilizadas para produção de compostos com maior valor agregado, preferencialmente a produção de intermediários químicos para a obtenção de polímeros com propriedades especiais como, polietileno linear de baixa densidade (frações C4-C10) e plastificantes (C8-C12) (MACEDO, 2012).

- Eteno

A capacidade global de produção de eteno é de 170 milhões de toneladas, sendo que os 10 maiores produtores foram responsáveis por aproximadamente 50% da produção global no ano de 2017. O Brasil representa apenas 2,2 % da capacidade de produção mundial (BRASKEM a, 2018).

- Propeno / Buteno-1 / Butadieno

Tratando-se de olefinas o principal produto é o eteno, entretanto, o processo de obtenção do mesmo permite a produção de co-produtos que também apresentam grande importância para a indústria química. A Figura 4 mostra o rendimento de co-produtos na produção de 1 unidade de eteno via diferentes matérias-primas.

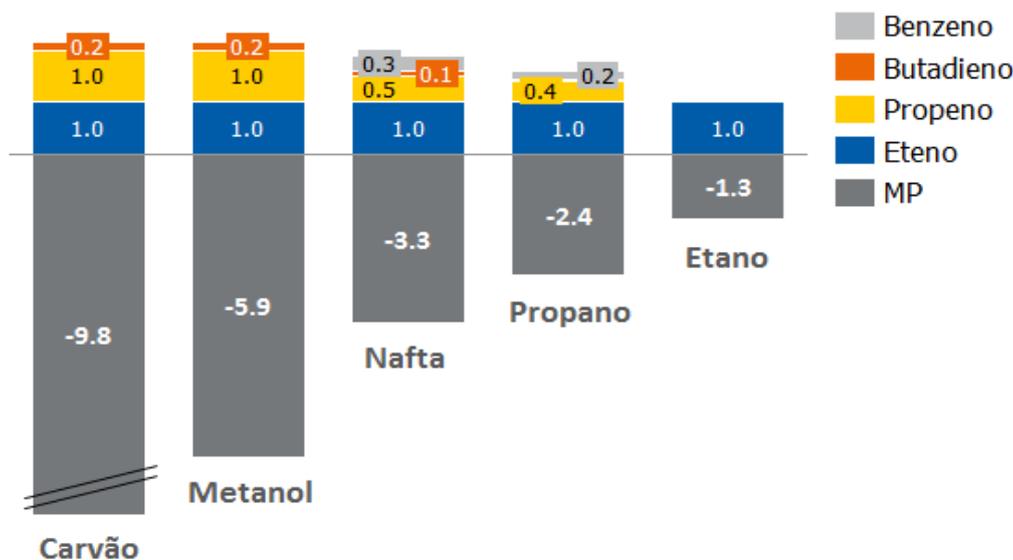


Figura 4 – Rendimento de co-produtos na produção de eteno via diferentes matérias-primas

Fonte: (BRASKEM a, 2018)

No Brasil, a Braskem é a única produtora de eteno. Suas plantas se situam nos quatro polos petroquímicos brasileiros localizados nos estados da Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo e Rio Grande do Sul.

A capacidade instalada nacional dos co-produtos de eteno é de 1.585 kt de propeno, 480 kt de butadieno e 96 kt de buteno-1.

- Aromáticos:

A cadeia de aromáticos, formada pelos hidrocarbonetos do grupo BTX (benzeno, tolueno e xileno), compõe matérias-primas para produtos como o PET (Polietileno Tereftalato): utilizadas em garrafas e fibras sintéticas, e o poliestireno: material empregado em eletroeletrônicos, eletrodomésticos, embalagens de iogurtes, copos, pratos e talheres e material escolar (QUÍMICA E DERIVADOS b, 2016)

- Benzeno

No Brasil, a Braskem é responsável por aproximadamente 95,3% da produção anual de benzeno (que está em torno de 1 milhão de toneladas), enquanto a Petrobras é responsável por aproximadamente 3,5% e a Gerdau (Carboquímica) por aproximadamente 1,2% da produção anual (REVISTA PETRO & QUÍMICA, 2016).

O Brasil tem um histórico excedente de produção de benzeno que é exportado conforme Gráfico 9:

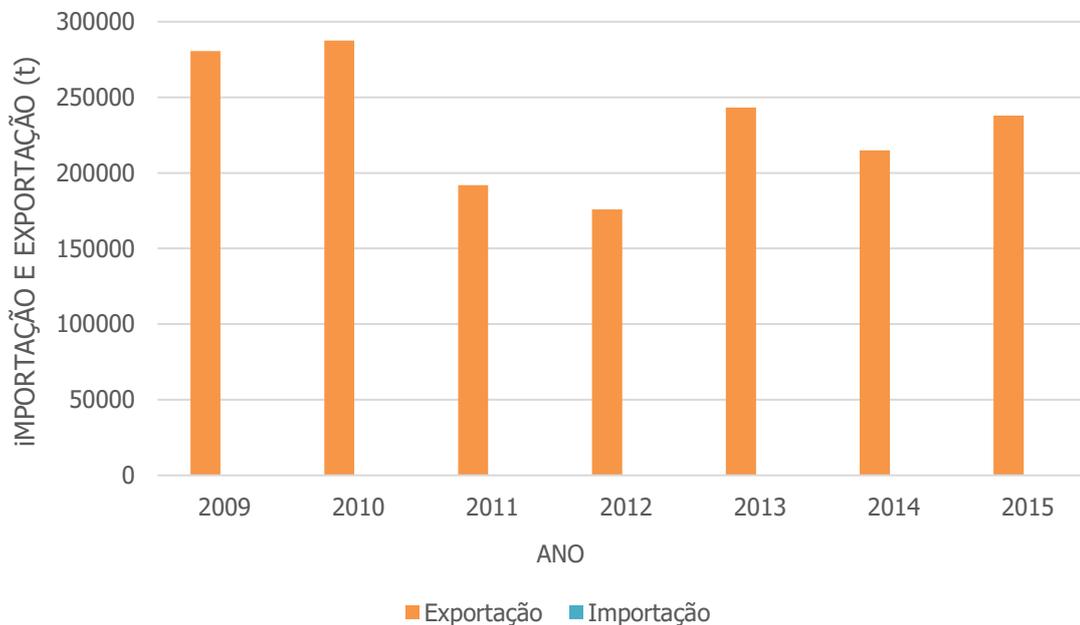


Gráfico 9 - Importação e exportação de benzeno

Fonte: (REVISTA PETRO & QUÍMICA, 2016)

○ Tolueno

Outro importante aromático é o tolueno, que tem 50% de sua demanda destinada a produção de benzeno e xilenos, ajustando as demandas do mercado de aromáticos, e 5% destinado a produção de outros produtos químicos (QUÍMICA E DERIVADOS b, 2016).

No Brasil, a Braskem é responsável por 69,6% da produção capacidade de produção anual de tolueno (que é de aproximadamente 280 mil toneladas no total), enquanto a Petrobras (RPBC) é responsável por 27,9% e a Unigel por 2,5%. Esses valores não incluem consumos das refinarias referentes a *booster* de octanagem por exemplo (QUÍMICA E DERIVADOS b, 2016).

○ Xilenos

O xileno é produto da cadeia dos aromáticos com grande mercado, usado principalmente para produção de PTA (*Purified Terephthalic Acid*) destinado para obtenção de PET. Nos últimos quinze anos houveram investimentos substanciais a nível global principalmente na região asiática. É estimado que o consumo global aumente a uma taxa média anual de 4,5% (QUÍMICA E DERIVADOS b, 2016).

No Brasil, o p-xileno tem sua produção concentrada apenas na Braskem, em Camaçari (BA). O o-xileno tem sua produção dividida entre as unidade da Braskem na Bahia e em São Paulo (QUÍMICA E DERIVADOS b, 2016).

O Brasil passou de exportador para importador de p-xileno em 2014 (Gráfico 10) em virtude da entrada em produção da planta de PTA da petroquímica SUAPE, em 2013.

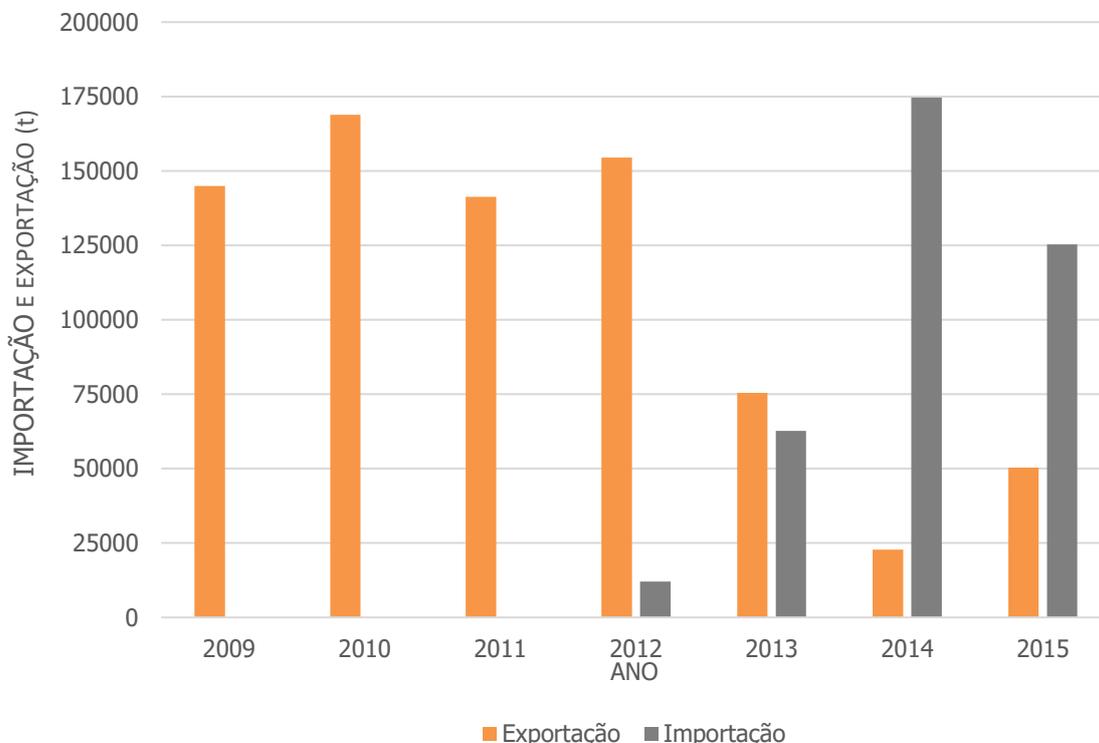


Gráfico 10 - Importação e Exportação de p-xileno

Fonte: (REVISTA PETRO & QUÍMICA, 2016)

2.a.3. Subsegmento Fertilizantes

Historicamente, a importância dos fertilizantes é considerável, visto que o mesmo é utilizado na produção de 35% dos alimentos consumidos pela humanidade, de acordo com dados da ABISOLO. Porém, embora alguns dos fertilizantes mais utilizados no mundo tenham sido desenvolvidos entre as décadas de 1950 e 1960, ou até mesmo antes, o investimento em avanços tecnológicos para esses produtos são pequenos quando comparado a outros avanços como a revolução tecnológica, científica, entre outras, mesmo sendo registradas diversas patentes de novos processos que acabam não sendo aplicadas na prática industrial (ABISOLO, 2017)

A Indústria de Tecnologia em Nutrição Vegetal, na qual se inclui o segmento de fertilizantes é caracterizada pelo constante investimento em inovações, sendo a principal diferenciação desse segmento as adições de matérias-primas intermediárias com tecnologia agregada à composição de suas formulações, pois isso permite a criação de produtos mais eficientes e formas de aplicação mais eficazes. Todos esses fatores atendem à demanda do campo, na busca contínua pelo aumento da produtividade e da qualidade do produto agrícola (ABISOLO, 2017).

Foram contabilizados, em 2017, 569 unidade produtoras de fertilizantes pelo mercado de Tecnologia em Nutrição Vegetal, sendo o estado de São Paulo responsável por aproximadamente 44% das unidades (ABISOLO, 2018).

Especificamente no subsegmento de fertilizantes foliares (fosfatados, nitrogenados e potássicos), existem 238 unidades produtoras registradas em 2017 e representou cerca de 71% do faturamento total da indústria de fertilizantes no ano. Do custo de fabricação dos produtos deste subsegmento, 12% corresponde a custos fabris, incluindo dispêndios com energia (ABISOLO, 2018).

A Tabela 3 mostra a evolução do faturamento e produção nos últimos 2 anos:

	2016	2017	2017*/2016
Faturamento líquido (US\$ bilhão)	8,6	9,1	5,8%
Faturamento líquido (R\$ bilhão)	29,9	29,0	-3,0%
Volume de venda (mil toneladas)	34.083	34.083	2,5%
Produção Nacional (mil toneladas)	9.041	8.442	-6,6%
Exportação (US\$ milhão FOB) ⁽¹⁾	213	134	-37,1%
Exportação (mil toneladas) ⁽¹⁾	549	330	-39,9%
Importação (US\$ milhão FOB) ⁽¹⁾	6.153	6.828	11,0%
Importação (mil toneladas) ⁽¹⁾	24.485	26.163	6,9%
Saldo comercial (US\$ milhão) ⁽¹⁾	5.940	6.695	12,7%

(1) Inclui matéria-prima para fertilizantes

*Projeção MacroSector Consultores

Tabela 3 - Dados de produção e faturamento setor fertilizantes anos 2016 e 2017

Fonte: (ABIQUIM, 2017)

- Principais Insumos - Fertilizantes Nitrogenados

No contexto mundial, temos como principais países produtores de fertilizantes nitrogenados China, Rússia, Índia e Estados Unidos, representando 55% do total produzido mundialmente, como pode ser observado no Gráfico 11 (ABISOLO, 2018).

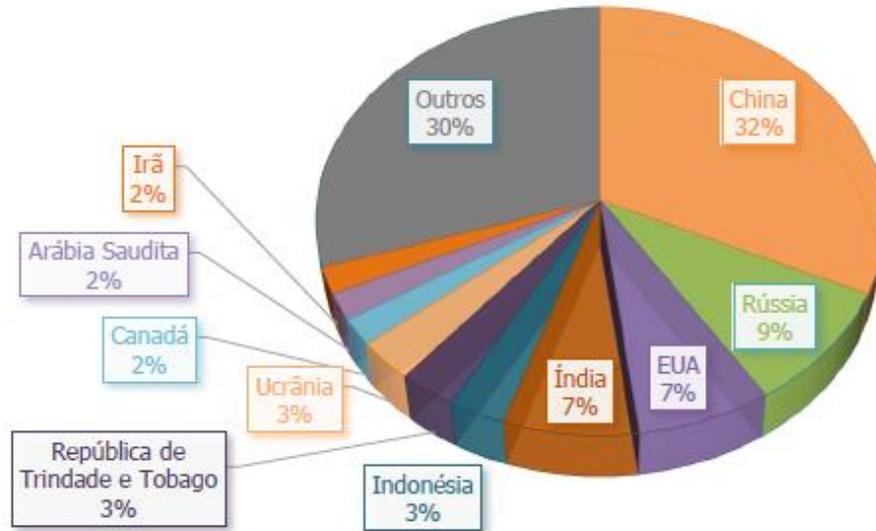


Gráfico 11 - Principais países produtores de fertilizantes nitrogenados

Fonte: (ABISOLO, 2018)

No contexto nacional, temos o Brasil como um grande importador de fertilizantes nitrogenados, importando um volume de 8,7 milhões de toneladas em 2017 (ABISOLO, 2018).

A única produtora de ureia no país é a Petrobras¹ e a produtora de nitrato de amônio é a Yara Brasil (antiga Vale Fertilizantes²). O sulfato de amônio é produzido pela Yara Brasil³, Petrobras e Unigel (ABISOLO, 2017). A Tabela 4 mostra a capacidade instalada de fertilizantes nitrogenados no Brasil em 2017.

FERTILIZANTES NITROGENADOS	CAPACIDADE INSTALADA (T EM 2017)
Amônia	1.583.650
Ureia	1.782.000
Nitrato de Amônio	591.000
Sulfato de Amônio	780.513

Tabela 4 - Capacidade instalada de fertilizantes nitrogenados no Brasil em 2017

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

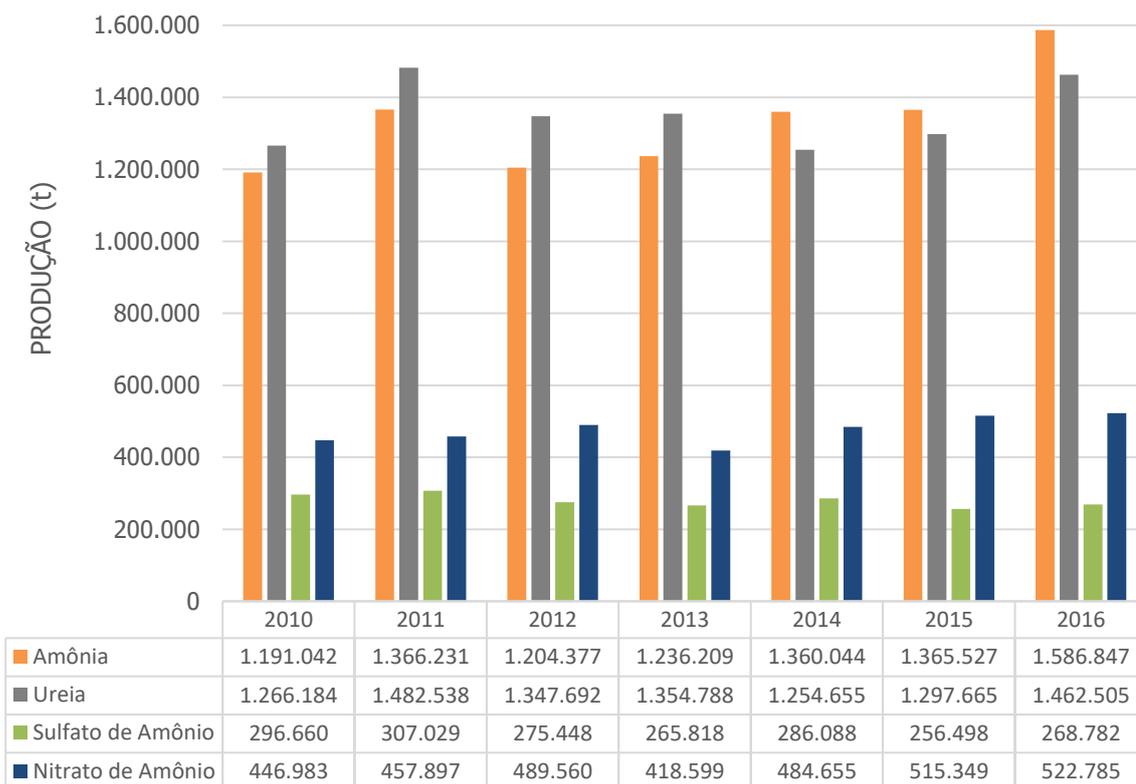
¹Em 27/03/18 foi anunciado a suspensão por 120 dias do fechamento das unidades da Fábricas de Fertilizantes Nitrogenados da Petrobras (FAFEN-BA e FAFEN-SE), todavia a empresa tem o prazo até 31/10/18 para entregar propostas ao processo de hibernação das fábricas (SARAIVA, 2018). Por outro lado, até o prazo estabelecido as unidades permanecem operando em regime normal.

²A Vale fertilizantes vendeu ativos de fertilizantes que inclui 5 minas de fosfato, 1 unidade de potássio e 4 fábricas de químicos e fertilizantes para Mosaic em 2016, e vendeu a unidade de fertilizantes de Cubatão para Yara em 2017.

³Planta paralisada.

Em 2016, a soma da produção dos fertilizantes nitrogenados atendeu cerca de 17% da demanda nacional. A produção nacional diminuiu em 6% quando comparada com 2015. As importações ocuparam não somente este espaço, mas também o aumento da demanda, resultando em um aumento de 28% nas importações em 2016 frente a 2015 (ABISOLO, 2017).

O Gráfico 12 mostra a evolução da produção de fertilizantes nitrogenados no Brasil.



(1) Dados de amônia de 2015 e 2016 dados estimados.

(2) Dados de ureia de 2014, 2015 e 2016 dados estimados.

Gráfico 12 - Perfil de produção anual de fertilizantes nitrogenados, subsegmento fertilizantes

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

Não há projeções para aumento de capacidade de produção de ureia. O Brasil importa cerca de 80% da demanda e é o maior importador mundial do produto. Projeções para 2021 indicam que a dependência no mercado externo pode chegar a 6,4 milhões de toneladas (ANDA, 2017).

- Principais Insumos - Fertilizantes Fosfatados

Em relação aos principais produtores dos fertilizantes fosfatados, vemos, de acordo com Gráfico 13, que China, Estados Unidos e Marrocos são responsáveis por aproximadamente 62% da produção mundial (ABISOLO, 2018).

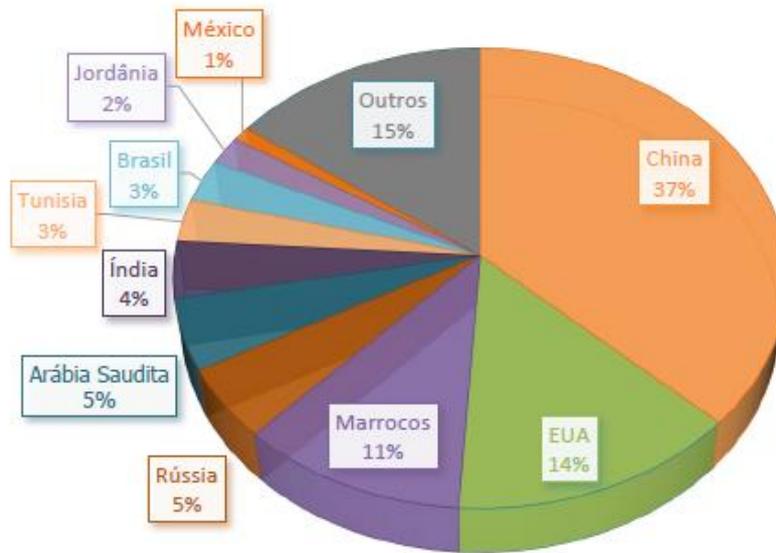


Gráfico 13 - Principais países produtores de fertilizantes fosfatados

Fonte: (ABISOLO, 2018)

O Brasil tem uma dependência menor em relação à produção de fosfatados. Em 2017 a produção de fosfato de monoamônio (MAP), fosfato de diamônio (DAP), superfosfato triplo (TSP) e superfosfato simples (SSP) correspondeu a 6,6 milhões de toneladas e as importações totalizaram 5,6 milhões de toneladas. A produção caiu 1% em relação ao ano de 2016 e as importações aumentaram 25% (ABISOLO, 2018).

Projeções indicam que haverá um aumento de 10% na produção de MAP (fosfato monoamônio) e DAP (fosfato diamônio) entre 2016 e 2021, mas a exposição do país para a importação do produto poderá chegar a 6 milhões de toneladas em 2021. O Brasil é o maior importador mundial de MAP (ANDA, 2017).

A Tabela 5 mostra a capacidade instalada de fertilizantes fosfatados no Brasil em 2017.

FERTILIZANTES FOSFATADOS	CAPACIDADE INSTALADA (T EM 2017)
Fosfato de Diamônio (DAP)	338.650
Fosfato de Monoamônio (MAP)	1.485.250
Superfosfato Simples (SSP)	5.508.644
Superfosfato Triplo (TSP)	1.019.000

Tabela 5 - Capacidade instalada de fertilizantes fosfatados no Brasil em 2017

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

- Principais Insumos - Fertilizantes Potássicos

Em relação aos principais produtores de cloreto de potássio, vemos, de acordo com Gráfico 14, que Canadá, Rússia, Bielorrússia e China são responsáveis por aproximadamente 78% da produção mundial (ABISOLO, 2018).

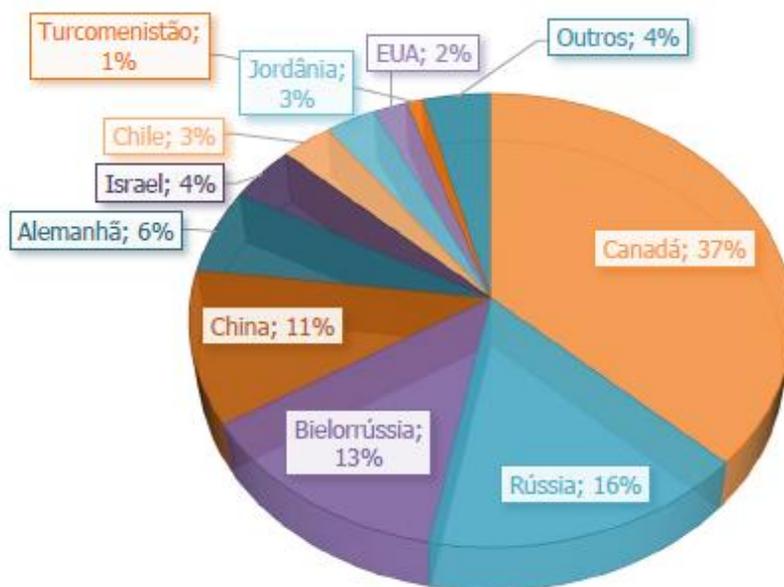


Gráfico 14 - Principais países produtores de cloreto de potássio

Fonte: (ABISOLO, 2018)

A produção nacional de cloreto de potássio relatada em 2017 foi de aproximadamente 485 mil toneladas, 3% menor que a produção registrada em 2016. Já as importações de 2017 tiveram um aumento de 11% em relação ao ano anterior, registrando 97 milhões de toneladas importadas (ABISOLO, 2018).

Projeções indicam que não haverá mudanças na capacidade de produção de cloreto de potássio, e o país continuará fortemente dependente da importação do produto. O Brasil é o segundo maior importador de cloreto de potássio e o nível de importação do produto é estimado crescer em 10% para 10 milhões de toneladas em 2021 (ANDA, 2017).

A Tabela 6 mostra a capacidade instalada de fertilizantes potássicos no Brasil em 2017.

FERTILIZANTES POTÁSSICO	CAPACIDADE INSTALADA (T EM 2017)
Cloreto de Potássio	767.690

Tabela 6 - Capacidade instalada de fertilizantes potássicos no Brasil em 2017

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

2.a.4. Subsegmento Alcoolquímico

A alcoolquímica é o segmento que utiliza álcool etílico para fabricação de diversos produtos químicos. Esse setor foi implantado no Brasil na década de 1920, porém foi abandonado por conta da consolidação da indústria petroquímica, e hoje está ressurgindo pela necessidade de se investir em alternativas mais sustentáveis não apenas do ponto de vista ambiental, mas também do ponto de vista econômico e social, apresentando grandes iniciativas na cadeia de eteno (CGEE, 2010).

A Braskem desenvolveu um processo que usa etanol de cana-de-açúcar como matéria-prima sustentável, criando assim o plástico polietileno verde *I'm green™*. Com início em 2010, a planta da Braskem, que possui capacidade de produção de 200 mil toneladas por ano, produz polietileno verde em escala comercial e industrial (BRASKEM b, 2018).

Cabe citar também a Cloretil, Butilamil, Oxiteno e Rhodia como produtores de diversos compostos na rota do acetaldeído para o mercado interno. E a Eleikeiroz produzindo produtos na rota dos crotonaldeídos, como o n-butanol (ABIQUIM a, 2018).

O Gráfico 15 mostra a evolução da produção de acetato de éteres e de álcool no Brasil.

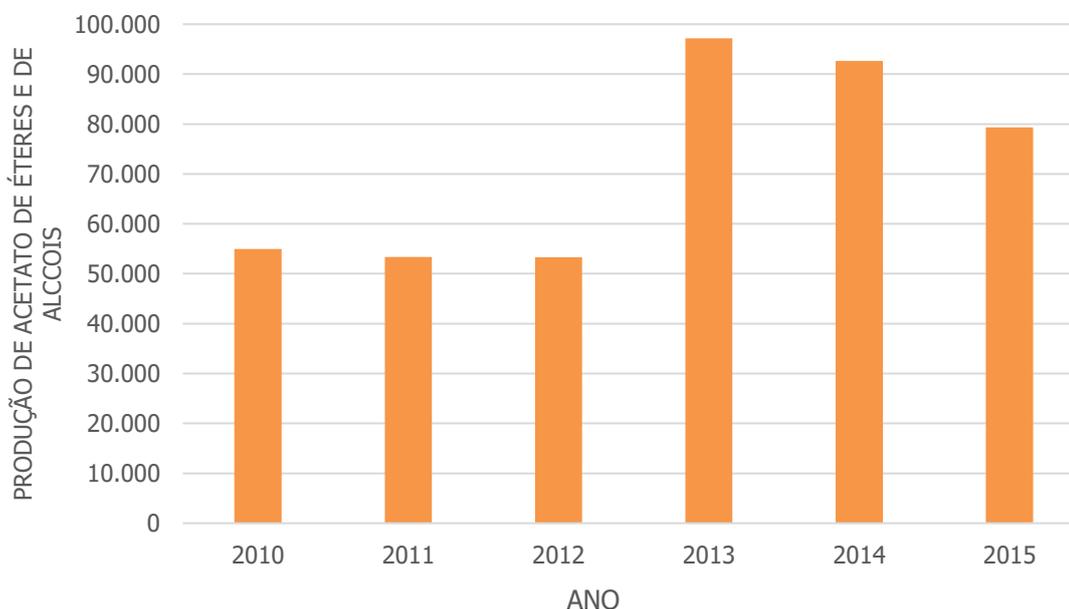


Gráfico 15 -Perfil de produção anual de acetato de éteres e de alcoois, subsegmento alcoolquímica

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

A Tabela 7 mostra a capacidade instalada dos principais produtos derivados do etanol no Brasil em 2017.

<i>PRODUTOS</i>	<i>CAPACIDADE INSTALADA (T EM 2017)</i>
Acetado de Éteres e de Álcoois	260.000
Ácido Acético	62.000
Eteno verde	200.000
n-Butanol	150.000

Tabela 7 - Capacidade instalada dos derivados de etanol no Brasil em 2017

Fonte: (ABIQUIM a, 2018)

É observado o interesse de outras empresas do setor petroquímico brasileiro em relação a utilização de etanol como matéria-prima mais sustentável, como é o caso por exemplo da Dow Química e Rhodia (CGEE, 2010).

As seguintes condicionantes foram identificadas para o desenvolvimento do segmento alcoolquímico no Brasil, no período de 2010 a 2015 (CGEE, 2010):

- Determinação do setor produtivo no sentido da implantação de unidades alcoolquímicas a partir de tecnologias competitivas com o setor petroquímico.
- Participação efetiva do setor sucro-alcooleiro no processo de expansão da indústria alcoolquímica.
- Apoio do governo à expansão da indústria alcoolquímica no Brasil.
- Estabelecimento de redes cooperativas envolvendo representantes da indústria química, setor sucro-alcooleiro, órgãos financiadores, universidades e centros de pesquisa visando o desenvolvimento tecnológico na área.
- Planejamento, instalação e operacionalização de consórcios envolvendo produtores de etanol, empresas químicas e o BNDES vislumbrando a instalação de processos alcoolquímicos nas destilarias.
- Definição de uma política de pessoal para as equipes das universidades e centros de pesquisa envolvidas no processo de desenvolvimento tecnológico.
- Estabelecimento de mecanismos de cooperação internacional nas áreas de P&D e industrial.

2.a.5. Subsegmento Gás-Químico

Para efeito deste estudo o segmento gás-químico corresponde à produção de petroquímicos, gás de síntese e hidrogênio a partir do gás natural.

- Petroquímicos:

Historicamente, a produção petroquímica brasileira a partir do gás natural, somente acontecia no polo petroquímico do Rio de Janeiro (Duque de Caxias), em virtude da necessidade da Petrobras escoar o gás natural produzido nas plataformas *offshore* (MOREIRA, et al., 2007)

A Braskem, no entanto, a partir de 2017 flexibilizou sua unidade de craqueamento no polo petroquímico de Camaçari, com um investimento de R\$ 380 milhões possibilitando a utilização do etano a partir do gás natural de xisto importado dos Estados Unidos. Desta forma abre outra rota de matéria-prima, diminuindo a dependência da nafta, cujo único produtor brasileiro é a Petrobras (ESTADÃO, 2018).

Com este investimento a Braskem, possibilitou a unidade da Bahia utilizar até 15% de etano importado no seu mix de matérias-primas (ESTADÃO, 2018).

- Gás de síntese e Hidrogênio:

O hidrogênio molecular (H_2) por apresentar facilidade de reação com outros elementos químicos é visto como uma matéria-prima com grande utilidade na indústria química e petroquímicas. Nas refinarias é o principal reagente no processo de dessulfurização (remoção do enxofre) de diversos combustíveis como a gasolina e óleo diesel, sendo cada vez mais importante devido maiores preocupações com a legislações ambientalmente (CRUZ, 2010).

Existem duas rotas químicas: oxidação parcial e reforma a vapor para produção de hidrogênio a partir do gás natural. A rota de reforma a vapor, mais difundida industrialmente, produz uma mistura de hidrogênio e óxidos de carbono, chamada gás de síntese (GASNET, 2013).

No Brasil a Air Liquide e Air Products são grandes produtoras dessa mistura, porém este ainda é um setor com poucas informações divulgadas (ABIQUIM a, 2018).

2.b. Informação do consumo de energia no segmento de química e sua participação na demanda industrial

O custo com energia é um fator importante no custo final de produtos para a indústria em geral, podendo chegar até 60% do custo total de produção para alguns segmentos industriais. Sendo assim, o investimento em medidas de eficiência energética nas indústrias se torna tão importante quanto um projeto de aumento de capacidade (MME, 2011).

Em 2016, o setor industrial foi responsável por 33% do consumo energético total do país, sendo o setor químico brasileiro responsável por 2,6% do consumo final de energia do país no mesmo ano. Esta participação segue uma tendência de queda nos últimos 10 anos, assim como a participação da indústria no total consumido (EPE, 2017).

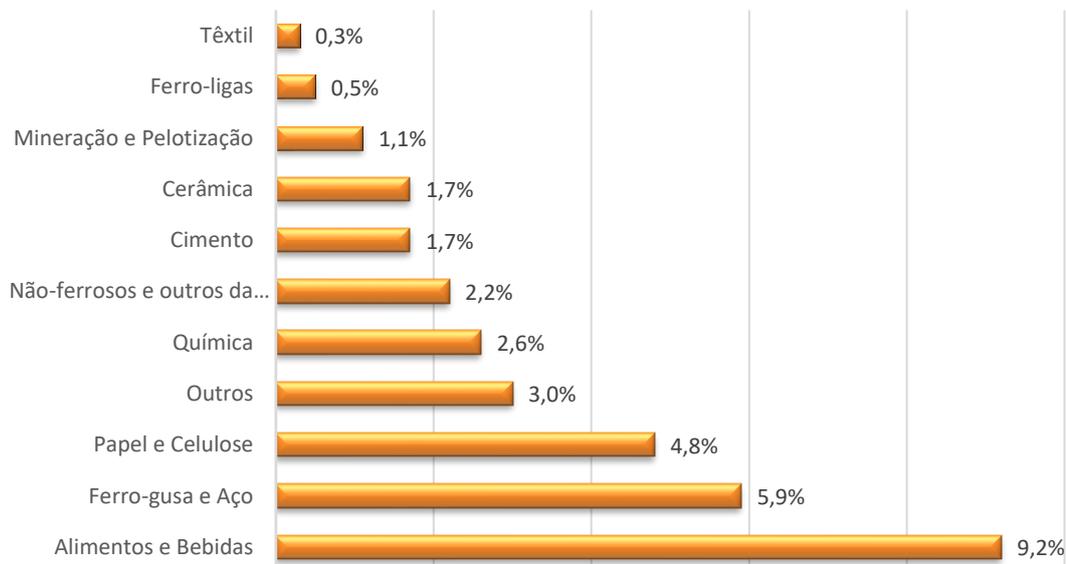


Gráfico 16 – Consumo energético dos subsegmentos do setor industrial referente a 2016

Fonte: (EPE, 2017)

O Gráfico 17 mostra os dados históricos do consumo energético percentual do total da indústria bem como do setor químico.

CONSUMO ENERGÉTICO (%)

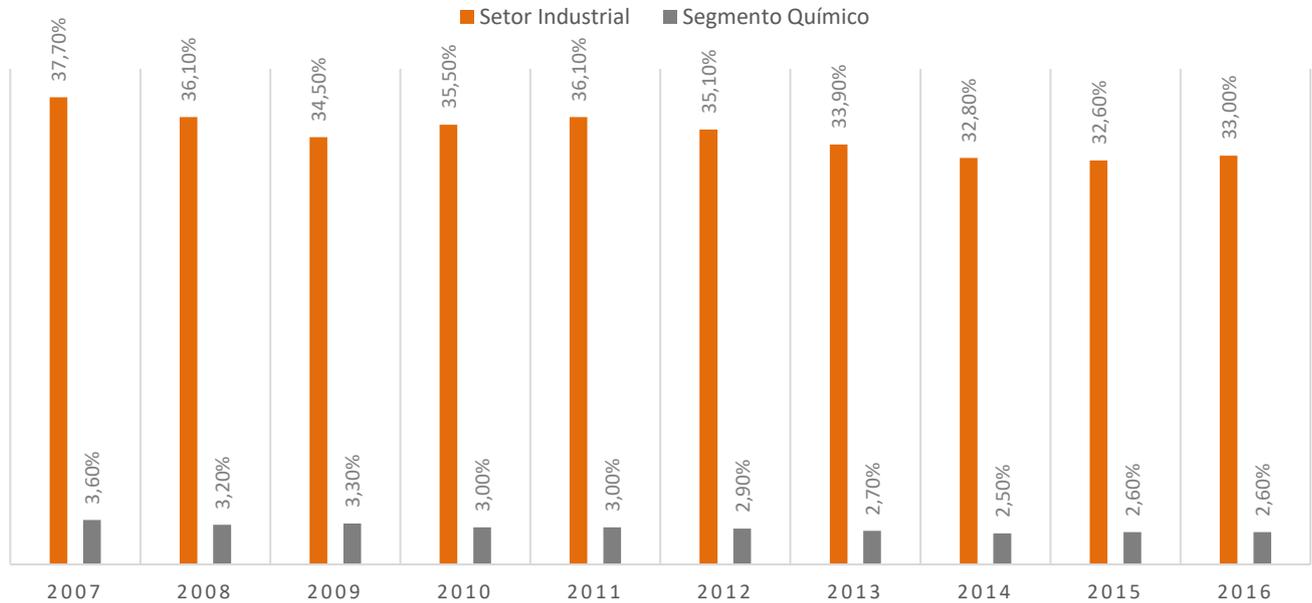


Gráfico 17 - Consumo energético final por setor (%)

Fonte: (EPE, 2017)

Medidas de eficiência energética tem se tornando cada vez mais importantes para as indústrias, evoluindo de trocas de equipamentos para otimização de processos, por exemplo. Com essa crescente importância, existe atualmente um grande investimento em ações de eficiência energética, que vão desde o uso de equipamentos de auto rendimento, integrações energéticas, soluções computacionais para um melhor gerenciamento dos processos até cogeração e trieração de energia (CGEE, 2017).

A distribuição do tipo de fonte de energia utilizado na indústria química em 2016 pode ser visto no Gráfico 18.

CONSUMO POR ENERGÉTICO

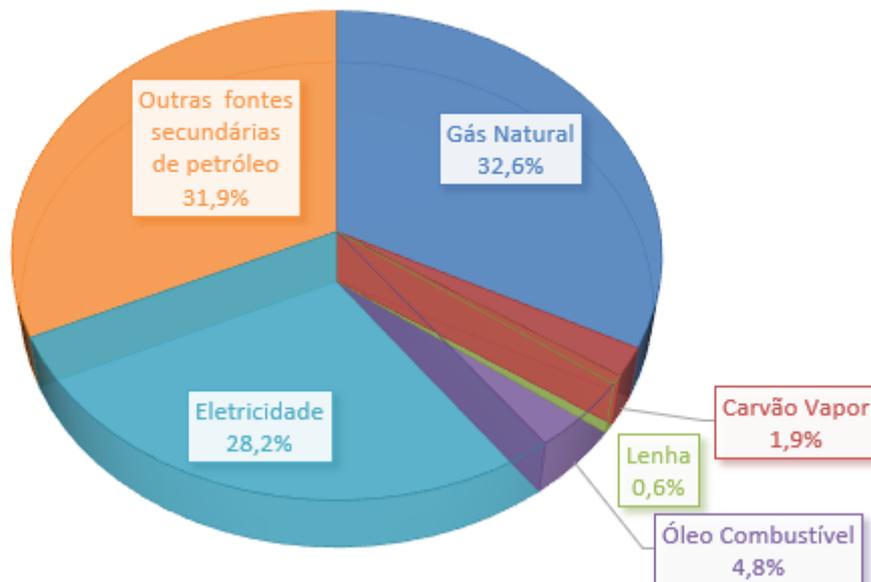


Gráfico 18 - Distribuição do consumo energético na indústria química por fonte energética

Fonte: (EPE, 2017)

Nota-se que eletricidade e gás natural são as duas principais fontes de energia primárias consumidas no setor químico. É importante observar que a parcela dos outros energéticos refere-se a outras fontes secundárias de petróleo, como gás de refinaria, coque e outros.

Quando se considera o PIB gerado pela indústria química, percebe-se uma redução da intensidade energética da ordem de 7,5% em 2016 comparado a 2007, ao contrário da indústria como um todo, que apresenta um aumento no consumo específico de energia por geração de valor na economia. Nota-se também que a indústria química já passou por anos mais energeticamente eficientes em 2013 e 2014, como pode ser observado na Tabela 8 e no Gráfico 19 (EPE, 2017).

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
INDÚSTRIA TOTAL	166,8	160,6	159,6	160,6	159,5	161,6	157,3	159,9	168,7	175,4
QUÍMICA	287,6	288,8	297,3	272,3	285,3	271,4	249,5	249,3	271,3	266,1

tep (toe) /106 US\$ ppc

* Dólar constante ppp de 2013

Tabela 8 - Consumo específico de energia por valor agregado (PIB)

Fonte: (EPE, 2017)

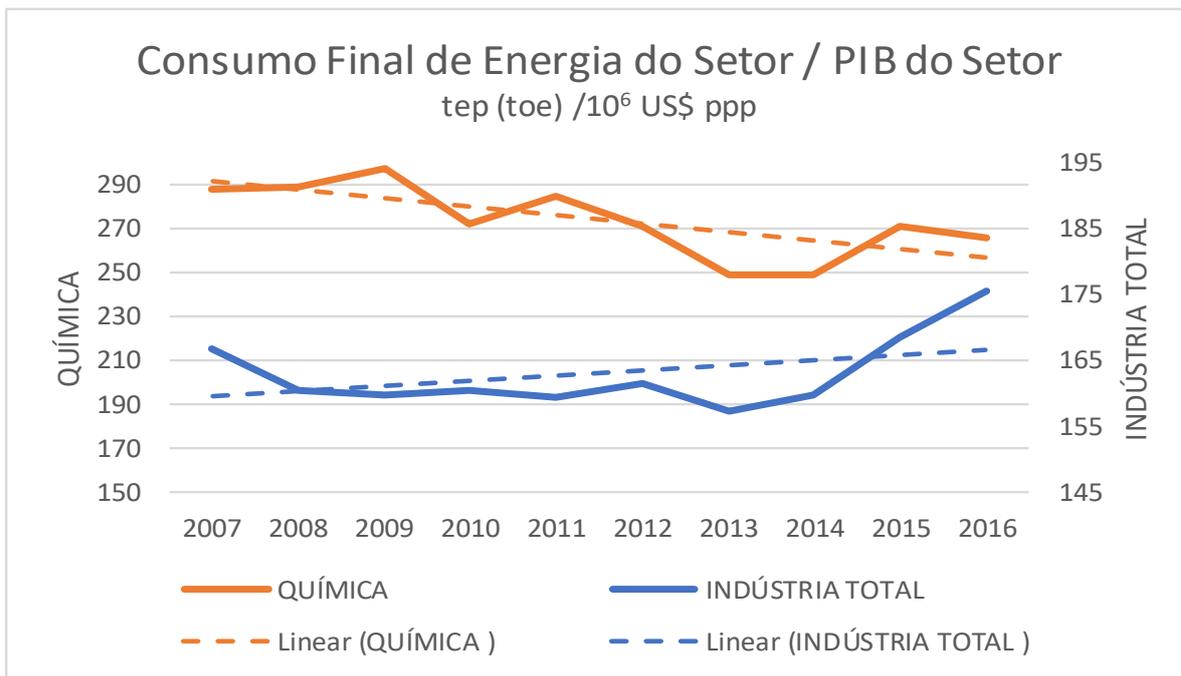


Gráfico 19 -Gráfico do consumo específico de energia por valor agregado e análise de tendência
Fonte: (EPE, 2017)

Como pode ser observado, a indústria química é energointensiva, e o custo de produção de produtos químicos básicos é altamente influenciado pelo custo com energia, podendo este representar até 80% do custo total, como é o caso da produção de amônia (CNI, 2010). Em alguns casos, como na produção de cloro, eletricidade é o principal insumo, responsável por mais de 45% (ABICLOR, 2014) do custo total de produção.

Em recente estudo, a CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos) elencou as principais ações para aumento de eficiência energética na indústria em geral de acordo com prioridade que podem ser vistas na Tabela 9.

PRIORIDADE	ROTA TECNOLÓGICA	TEMÁTICA
1	Indicadores e <i>benchmark</i>	Gestão de energia
2	Padrões, normas e regulamentos	Gestão de energia
3	Sistema de bombeamento	Uso de energia
4	Avaliação de resultado de programas EE na indústria	Gestão de energia
5	Sistema de supervisão e controle de energia	Gestão de energia
6	Sistemas térmicos	Uso de energia
7	Sistema de resfriamento e refrigeração	Uso de energia
8	Integração de fontes energéticas dentro da unidade industrial	Tecnologias de integração
9	Compartilhamento energético em complexos industriais	Tecnologias de integração

PRIORIDADE	ROTA TECNOLÓGICA	TEMÁTICA
10	Sistema de ventilação	Uso de energia
11	Sistema de transporte de massa	Uso de energia
12	Motores elétricos	Uso de energia
13	Gerenciamento pelo lado da demanda	Tecnologias de integração
14	Processos de separação	Uso de energia
15	Processos termo e eletroquímicos	Uso de energia
16	Sistemas de ar comprimido	Uso de energia
17	Uso de resíduos industriais	Uso de energia

Tabela 9 - Lista de ações para aumento na eficiência energética na indústria
Fonte: (CGEE, 2017)

2.c. Indicadores que serão quantificados a partir da análise da realidade brasileira atual

Os indicadores energéticos são uma ferramenta importante para analisar interações entre a atividade econômica e humana, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Os indicadores que serão quantificados neste estudo serão:

Consumo Específico

Para cada equipamento, planta ou instalação caracterizada por um parâmetro de atividade único, pode-se calcular o consumo específico de energia como o quociente entre o consumo final de energia da instalação e cada unidade de cada atividade. Mede-se em (unidades de energia) / (unidades de produção), por exemplo [GJ/tonelada] ou [kWh/tonelada].

O consumo específico é característico da tecnologia de produção (não depende dos volumes de fabricação): independentemente do valor da produção da instalação, o valor do consumo específico não varia. Só mudaria no caso em que as instalações perdessem ou ganhassem eficiência por modificação nas condições de operação ou manutenção, assim como em caso de mudança das tecnologias de processo por outras de maior eficiência.

Rendimento Energético

O rendimento energético de uma máquina é a relação entre a quantidade de energia útil e a energia fornecida (consumo final). Se uma máquina apresenta um elevado rendimento, isso significa que tem poucas perdas de energia, enquanto uma máquina com um baixo rendimento desperdiça grande parte da energia.

O conceito de rendimento energético adotado neste estudo se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo. Esta simplificação, por um lado, facilita a determinação dos rendimentos energéticos de equipamentos em uso

e introduz algumas distorções quanto ao significado das perdas energéticas estimadas pelo modelo.

Usando esse conceito, o modelo não vai estimar todas as perdas do processo produtivo. As perdas reais serão sempre maiores do que as estimadas, portanto, as possibilidades reais de economia de energia serão maiores que as estimadas através do modelo.

Outra questão que se levanta é a de que o rendimento estimado deve retratar a média dos rendimentos de transformação de uma forma de energia final para um dado uso final dentro de um setor de atividade.

Coefficiente de destinação

Os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens de energia que são destinadas a cada uso final de energia:

- Força motriz: energia usada em motores estacionários ou de veículos de transporte, individual ou coletivo, de carga, tratores, etc.
- Calor de Processo: Energia usada em caldeiras e aquecedores de água e fluidos térmicos.
- Aquecimento Direto: Energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e micro-ondas.
- Refrigeração: energia usada em geladeiras, freezers, equipamentos de refrigeração e ar condicionado, tanto de ciclo de compressão como de absorção.
- Iluminação: energia usada em iluminação de interiores e externa.
- Eletroquímica: Energia usada em células eletrolíticas, processos de galvanoplastia, eletroforese e eletrodeposição.
- Outros usos: energia usada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de controle.

Os coeficientes são coletados por meio de entrevistas as empresas, pesquisas junto aos fornecedores de equipamentos, programas de governo e outras bases de dados. O coeficiente de destinação de uma determinada forma de energia final é impactado por mudanças estruturais nos padrões de consumo da sociedade. O coeficiente de eficiência energética de um determinado equipamento expressa seu rendimento na transformação da energia final em algum uso final, e é impactado por alterações tecnológicas e culturais.

3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL

3.a. Processos de produção principais do subsegmento Soda-Cloro

De modo geral, o processo de obtenção de soda-cloro utiliza como insumos a eletricidade, a água e o sal, que pode ser de origem marinha ou salgema, e ocorre conforme o fluxograma de processo, apresentado na Figura 5.

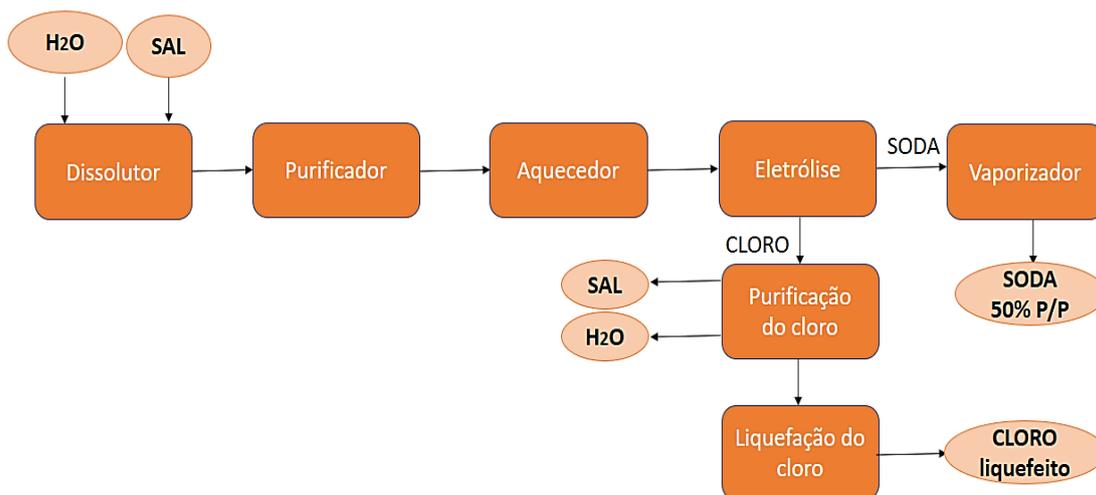


Figura 5 - Diagrama de blocos do processo de obtenção de soda-cloro

Fonte: (GUPTA, 2015)

1-Dissolutor: O sal é dissolvido em água para formação da salmoura no tanque de dissolução.

2-Purificador: A salmoura (água e sal) saturada é enviada para um tanque de purificação para remoção das impurezas.

3-Aquecedor: A salmoura purificada sofre um leve aquecimento para diminuir a demanda de energia utilizada na eletrólise.

4-Eletrólise: Na eletrólise ocorre a formação dos produtos, essa etapa varia de acordo com as tecnologias utilizadas no processo, que será detalhada a seguir. Após a eletrólise os produtos são removidos da célula eletrolítica.

A salmoura é adicionada nas células eletrolíticas que utilizam corrente elétrica para transformar o reagente em produtos. Uma célula eletrolítica é ativada pela aplicação de uma corrente elétrica externa. Isso cria um potencial elétrico através do cátodo e ânodo, e força uma reação química a ocorrer no eletrólito. Os cátions fluem em direção ao cátodo e são reduzidos. Os ânions fluem para o ânodo e são oxidados. Dois novos produtos são formados, um produto no catodo e um no ânodo.

5- Purificação do Cloro: O cloro é lavado e resfriado para remover o sal, e ainda desidratado antes de ser envasado em cilindros ou liquefeito.

6-Liquefação do Cloro: O cloro é liquefeito e armazenado em baixa temperatura.

7-Vaporizador: A soda cáustica é concentrada em um vaporizador para uma concentração de cerca de 50% para comercialização.

Como citado anteriormente, atualmente existem três tecnologias amplamente utilizadas para a produção de soda-cloro na indústria brasileira (diafragma, membrana e mercúrio) que apresentam pequenas variações no processo, entretanto possuem uma substancial diferença na demanda de energia.

3.a.1. Tecnologia 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. Esse diafragma em instalações mais recentes pode ser de resina polimérica em substituição ao amianto crisotila (ABICLOR b, 2018).

De acordo com esquema mostrado na Figura 6, podemos ver que o processo via diafragma ocorre com a salmoura sendo introduzida no compartimento anódico e fluindo através do diafragma para o compartimento catódico. Neste processo, quando a corrente elétrica passa pela salmoura os íons de cloro e de sódio se movem em direção aos eletrodos, e com isso temos a formação de gás cloro no ânodo e soda cáustica e gás hidrogênio no cátodo, resultado da reação dos íons sódio com água. Após o processo, algum sal permanece na solução com a soda cáustica, podendo ser removido em um estágio posterior (IEB, 2003).

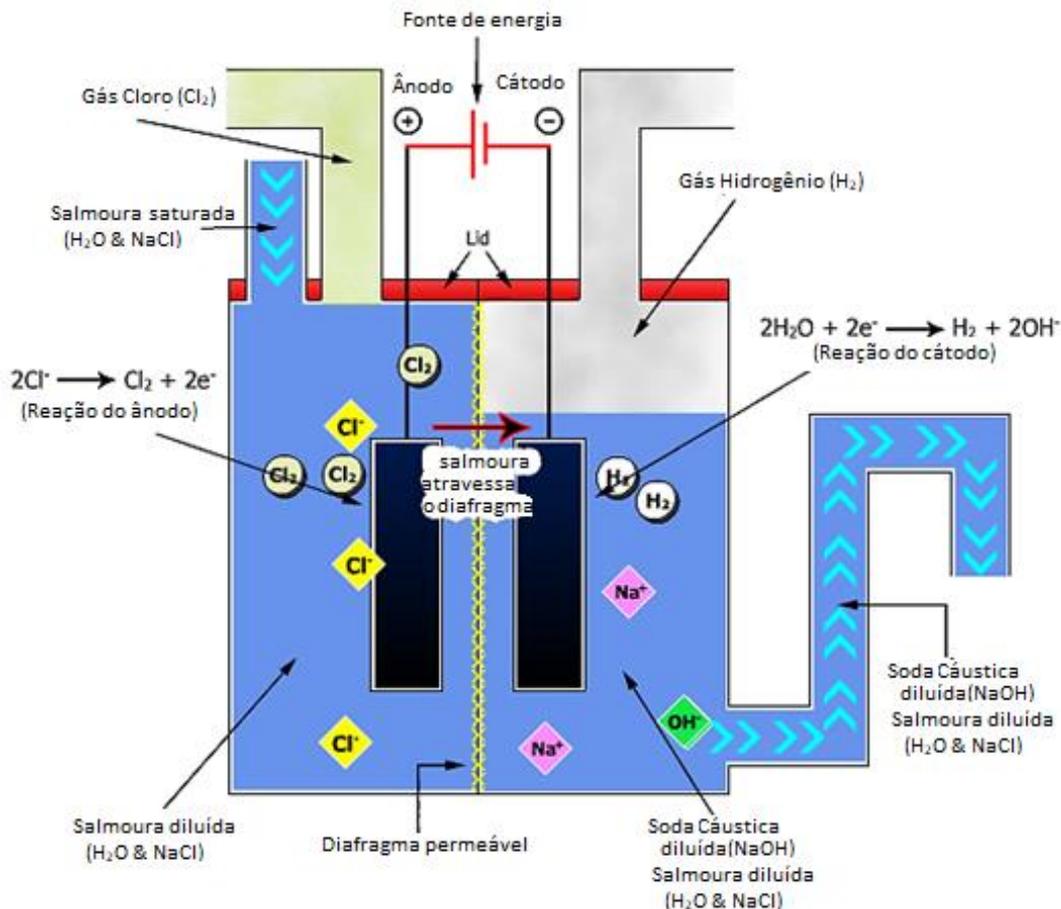


Figura 6 – Célula eletrolítica tecnologia diafragma

Fonte: (ABICLOR b, 2018)

3.a.2. Tecnologia Membrana

Diferentemente do processo por diafragma, no processo por membrana os dois eletrodos são separados por uma membrana seletiva de íons. Assim como no processo descrito anteriormente, a salmoura é bombeada para o compartimento anódico e flui para o compartimento anódico, onde somente os cátions passam através da membrana, devido à carga dos íons (IEB, 2003).

No ânodo os íons de cloro da salmoura são oxidados em gás cloro, e no cátodo os íons hidrogênio na água são reduzidos a gás hidrogênio. Os íons de sódio fluem através da membrana para o compartimento catódico e reagem com os íons hidróxidos restantes da água para formar hidróxido de sódio (NaOH). Os íons de cloreto não podem passar, então o cloro não entra em contato com o hidróxido de sódio no compartimento do cátodo. O hidróxido de sódio é removido da célula (IEB, 2003).

A vantagem de usar este método é o fato de que a solução de cloreto de sódio permanece separada do hidróxido de sódio que é produzido, fazendo com que o

mesmo seja muito puro. O processo também usa menos eletricidade e é mais barato de operar (IEB, 2003).

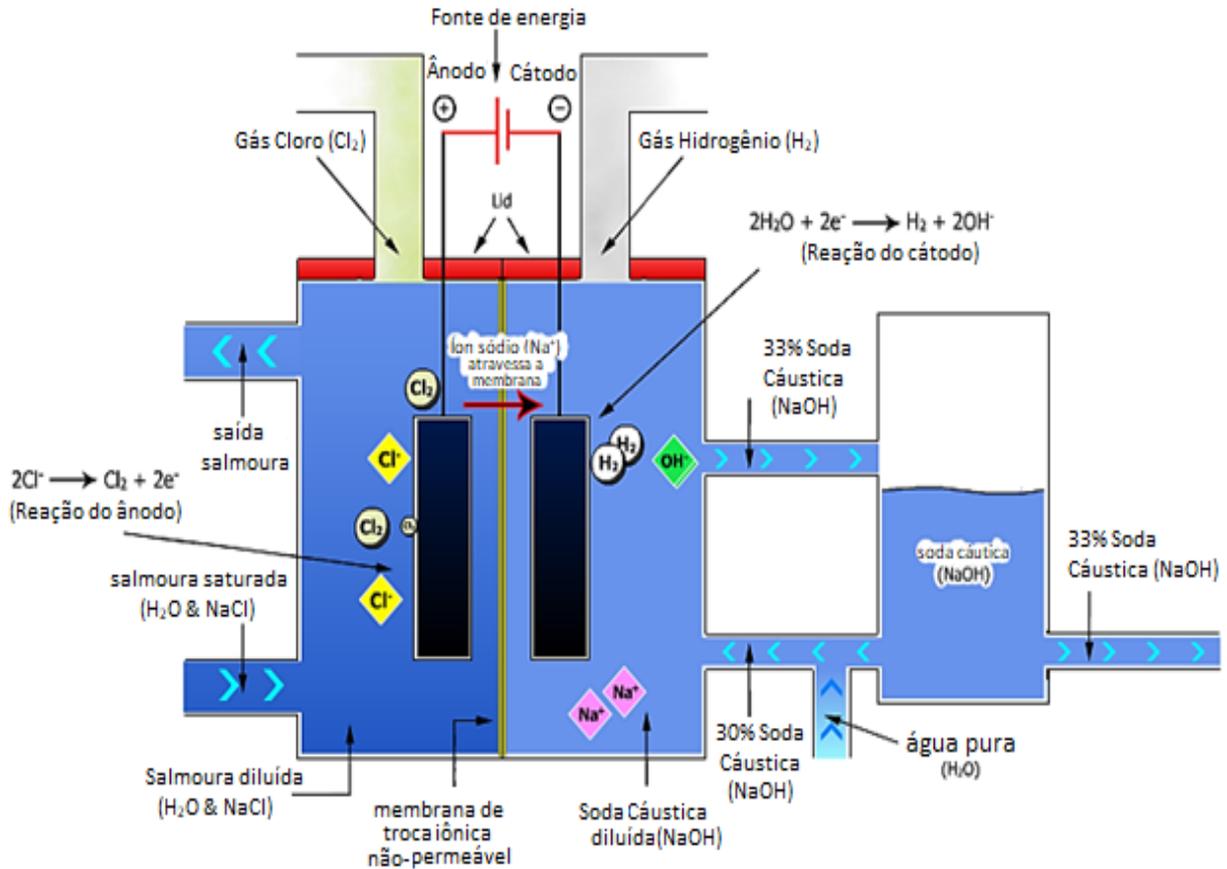


Figura 7 - Célula eletrolítica tecnologia membrana

Fonte: (ABICLOR c, 2018)

3.a.3. Tecnologia Mercúrio

Assim como nas outras tecnologias, na célula de mercúrio a salmoura passa por uma câmara anódica com eletrodo de carbono e então flui pelo chão desta câmara, que atua como o compartimento catódico. Com a aplicação a corrente elétrica, os íons cloreto são oxidado formando o gás cloro e os íons de sódio são reduzidos a sódio. Esse sódio formado se dissolve no mercúrio formando uma amálgama de sódio em mercúrio que é então despejada em um recipiente separado, decompondo-se em sódio e mercúrio. Este sódio decomposto reage com a água do compartimento produzindo soda cáustica e gás hidrogênio, enquanto o mercúrio é recuperado para a célula eletrolítica (IEB, 2003).

Uma desvantagem observada no método via célula de mercúrio é a toxicidade e alto preço do mercúrio. Embora o mercúrio seja recuperado dentro do processo para ser reutilizado na célula eletrolítica, uma pequena parte dele segue com a soda cáustica

O craqueamento térmico de hidrocarbonetos, em condições severas, é a principal rota para a produção das olefinas leves, especialmente o eteno. Neste processo está envolvida a quebra de ligação covalente simples dos hidrocarbonetos saturados, sendo necessária uma grande quantidade de energia para a formação da dupla ligação, formando hidrocarbonetos saturados. As condições do processo envolvem altas temperaturas, numa faixa de 750 °C a 900 °C, e presença de vapor da água, favorecendo o fim da quebra de moléculas de nafta e/ou gás natural, tendo como foco a geração de olefinas (MEIRELLES, 2014).

No processo de pirólise, temos como principais matérias-primas a nafta petroquímica, o gasóleo, o gás natural e os condensados que são fracionados pela indústria petroquímica. Em relação a nafta, é observada a necessidade de um alto teor parafínico na corrente de alimentação (acima de 75%), facilitando o craqueamento já que quanto maior a relação H/C, maior a tendência ao craqueamento (MEIRELLES, 2014).

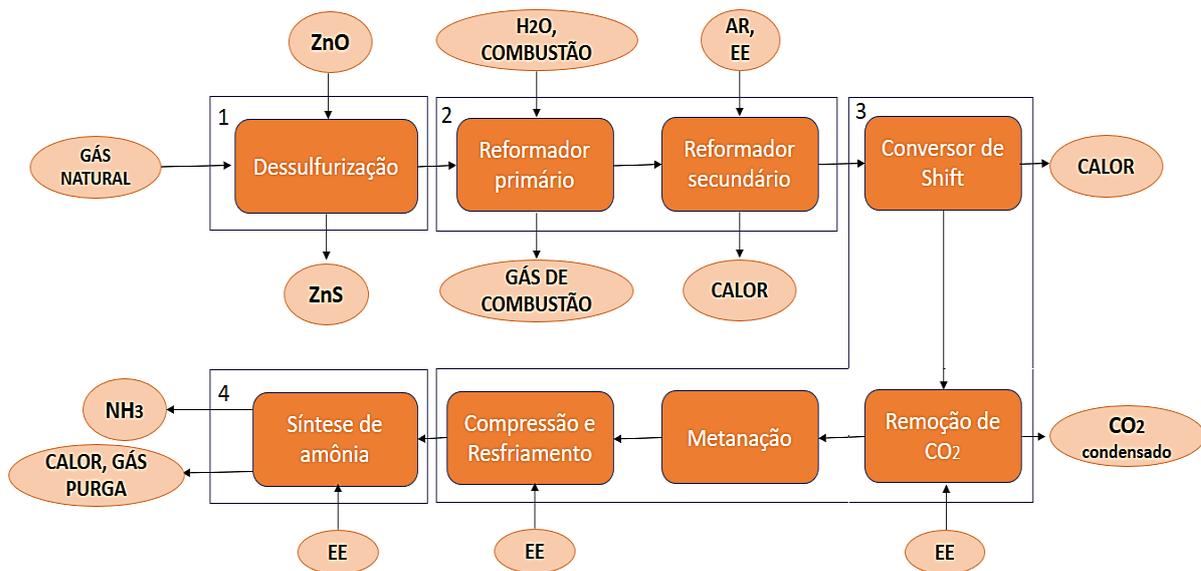
Outro processo utilizado para produção de petroquímicos básicos, como anteriormente mencionado, é o craqueamento calítico fluido (FCC). Neste processo, as moléculas pesadas presentes nos gasóleos e resíduos da alimentação são quebradas via processo catalisado, por catalisadores de alumino-silicatos, a altas temperaturas. Como resultado, temos a formação de moléculas mais leves, devido a quebra, e por conta da seletividade do catalisador temos a formação preferencialmente de moléculas de três a doze átomos como por exemplo propeno, GLP, gasolina. Em menores proporções é observado também a formação de gases leves e coque, o qual é depositado na superfície do catalisador (MEIRELLES, 2014).

Já no processo de reforma catalítica, é feita a alimentação pela nafta de destilação direta (nafta DD) ou a nafta de coqueamento hidrotratada (NHK). Nesse processo é gerada a nafta reformada, ou seja, uma corrente na faixa de destilação da nafta com alta concentração de hidrocarbonetos aromáticos. Essa corrente pode ter dois destinos: ser misturada a outras correntes de nafta para formulação de gasolina, ou ser levada a processos de separação e purificação para produção de benzeno, tolueno e xileno de alta pureza (MEIRELLES, 2014).

3.c. Processos de produção principais do subsegmento Fertilizantes

3.c.1. Amônia

A produção de amônia por reforma catalítica de hidrocarbonetos leves com vapor d'água envolve quatro etapas principais: dessulfurização da matéria-prima, geração do gás de síntese ($H_2 + CO$), separação e purificação do hidrogênio (reações de Shift, remoção de CO_2 e metanação) e síntese da amônia (BARROS & FARIA, 2015). A Figura 9 mostra o diagrama de blocos do processo descrito.



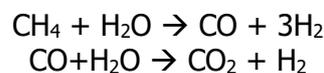
Legenda: EE = energia elétrica

Figura 9 - Diagrama de blocos do processo de produção de amônia por reforma a vapor do gás natural

Fonte: (BARROS & FARIA, 2015)

1-Dessulfurização: Os compostos sulfurosos são removidos do gás natural para prevenir o envenenamento dos catalisadores. Estes são removidos através de redução catalítica por excesso de oxigênio, seguido de aquecimento do gás a 400 °C, reagindo com óxido de zinco e sendo retirado como sólido.

2-Geração do gás de síntese: No processo de Reforma a vapor, o vapor superaquecido é alimentado no reformador primário com o metano, onde ocorre a reforma a vapor. Essa mistura gasosa é aquecida no forno, utilizando como energéticos gás natural e gás de purga a 770 °C. A reação ocorre na presença de um catalisador de níquel, favorecendo a conversão do metano em hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e pequenas quantidades de monóxido de carbono (CO), essa mistura é conhecida como gás de síntese.



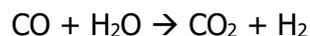
O gás de síntese é levemente resfriado a 735 °C e alimentado no reformador secundário, onde é misturado com uma quantidade calculada de ar. A reação altamente exotérmica entre o oxigênio e o metano produz mais hidrogênio (H₂) e fornece o nitrogênio necessário no processo de síntese de amônia.

O processo de reforma a vapor é preferível na produção de amônia, pois entrega uma razão de H₂/CO na faixa de 3-4, maximizando produção de hidrogênio.

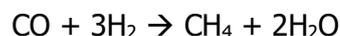
3-Separação e Purificação: Nessa etapa contaminantes como, água, dióxido de carbono e monóxido de carbono devem ser removidos da corrente de gás para evitar

a oxidação do ferro puro, utilizado como catalisador na etapa de formação da amônia. Esse procedimento é realizado em três etapas: Remoção de monóxido de carbono, remoção de água e remoção de dióxido de carbono.

- a. Remoção de monóxido de carbono (Conversor de Shift): O monóxido de carbono é convertido em dióxido de carbono, em duas etapas: Primeiramente, a corrente gasosa passa através de um catalisador de Cr / Fe₃O₄ a 360 °C e em seguida, sobre um catalisador de Cu / ZnO / Cr a 210 °C. A mesma reação ocorre em ambas as etapas, todavia o uso das duas etapas maximiza a conversão (COPPLESTONE & KIRK, 2018).

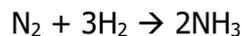


- b. Remoção de água: A mistura gasosa é arrefecida a 40 °C, temperatura à qual a água condensa e é removida (COPPLESTONE & KIRK, 2018).
- c. Remoção de dióxido de carbono: A mistura gasosa é bombeada em contra-corrente com uma solução na qual o dióxido de carbono é altamente solúvel, e mais de 99,9% do CO₂ da mistura se dissolve nele. O CO₂ remanescente (assim como qualquer CO que não foi convertido em CO₂ na etapa de remoção de monóxido de carbono) é convertido em metano (metanação) usando um catalisador de Ni / Al₂O₃ a 325 °C. A água produzida nestas reações é removida por condensação a 40 °C, como descrito anteriormente (COPPLESTONE & KIRK, 2018).



A mistura de gases é então resfriada, comprimida e alimentada no loop de síntese de amônia.

4-Síntese da amônia: A amônia presente é removida e os gases não reagidos são aquecidos a 400 °C a uma pressão de 330 barg sobre um catalisador de ferro. Nestas condições, 26% do hidrogênio e nitrogênio são convertidos em amônia. O gás de saída do conversor de amônia é resfriado de 220 °C para 30 °C. Esse processo de resfriamento condensa mais que a metade da amônia, que é então separada. O gás restante é misturado com o gás da saída do estágio de compressão e resfriamento (COPPLESTONE & KIRK, 2018).



3.c.2. Ureia

A produção da ureia ocorre em duas etapas, primeiro é formado o carbamato de amônio (NH₂CO₂NH₄) e posteriormente ocorre a desidratação do carbamato para a geração da ureia.

O carbamato que resta após a eliminação do excesso de amônia do efluente do reator de síntese é removido da corrente de ureia através de sua decomposição em dióxido de carbono e amônia (Figura 10). A solução de ureia que é formada no processo de decomposição do carbamato pode ter diferentes fins, como por exemplo ser usada na elaboração de fertilizantes líquidos ou pode ser concentrada para o processo de cristalização, estando em forma de cristais, grânulos ou pérolas (SARTORE, 2014).

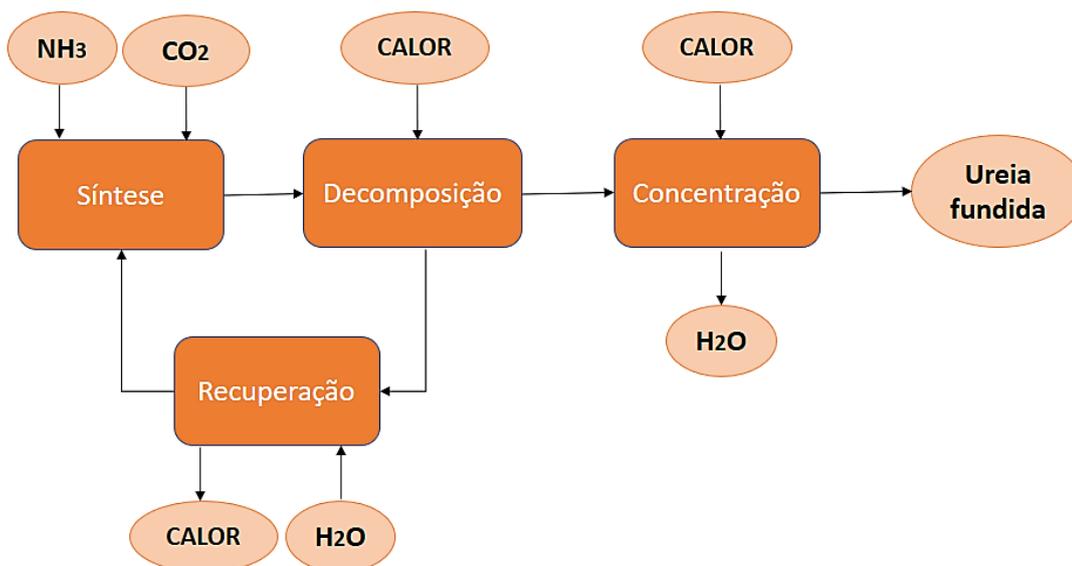


Figura 10 - Diagrama de blocos do processo de produção de ureia

Fonte: (COPPLESTONE & KIRK, 2018)

1-Síntese de ureia: Carbamato de amônio é formado por uma reação fortemente exotérmica de uma mistura de dióxido de carbono comprimido e amônia a 240 barg. No primeiro reator é atingida uma conversão de dióxido de carbono em ureia de 78%, e o líquido é então purificado. No segundo reator, é recebido o gás do primeiro reator e o gás reciclado das seções de decomposição e concentração. É atingida uma conversão de dióxido de carbono em ureia de aproximadamente 60% a uma pressão de 50 barg, sendo a solução purificada no mesmo processo usado para o líquido do primeiro reator. Como impurezas nessa etapa, temos principalmente a água e os reagentes não consumidos (COPPLESTONE & KIRK, 2018).

2-Decomposição e Recuperação: Devido a redução de pressão de 240 para 17 barg e o aquecimento da solução, o carbamato de amônia se decompõe em amônia e dióxido de carbono e os reagentes não consumidos são removidos (COPPLESTONE & KIRK, 2018).

Conjuntamente, a pressão é gradativamente reduzida, para 2,0 barg e então para -0,35 barg, e com isso ocorre o desprendimento da amônia e dióxido de carbono da solução. Na pressão de -0,35 barg, tem-se uma solução pura de ureia dissolvida em água (COPPLESTONE & KIRK, 2018).

A cada estágio do processo, a retirada dos reagentes não consumidos é feita pela absorção por uma corrente de água e o excesso de amônia é purificado e usado como matéria-prima para o reator primário (COPPLESTONE & KIRK, 2018).

3-Concentração: 75% da solução de ureia é aquecida sob vácuo, o que evapora parte da água, aumentando a concentração de ureia de 68% p / p para 80% p / p. Nesta fase, alguns cristais de ureia também se formam. A solução é então aquecida de 80 a 110 °C para redissolver estes cristais antes da evaporação. No estágio de evaporação, a ureia fundida (99% p/p) é produzida a 140 °C (COPPLESTONE & KIRK, 2018).

Os 25% restantes da solução de 68% p / p de ureia são processados sob vácuo a 135 °C em um arranjo separador-evaporador de duas séries (COPPLESTONE & KIRK, 2018).

3.c.3. Nitrato de amônio

O processo de fabricação de nitrato de amônio consiste da neutralização entre a amônia com ácido nítrico sob condições controladas, conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 11.



Figura 11 - Diagrama de blocos do processo de produção de nitrato de amônio

Fonte: (PESCE & JENKS, 1992)

1-Neutralização: A amônia anidra e o ácido nítrico (50% - 60%) são alimentados ao neutralizador, onde a água é evaporada pelo calor da reação (1279,3-1442,12 kJ / kg de nitrato de amônio, dependendo da força do ácido). Por questão de segurança, contra explosividade, a unidade de fabricação de nitrato de amônio deve ser operada abaixo de 121 °C (PESCE & JENKS, 1992).

2-Evaporação: Após a neutralização, a concentração final da solução é feita em um evaporador de fluido descendente, no qual uma corrente de ar ajuda a transportar o vapor de água. O fluxo de ar do evaporador é misturado com o do esferolizador para limpeza em um purificador úmido (PESCE & JENKS, 1992).

3-Misturador: Um aditivo ou agente de nucleação é adicionado à massa fundida antes da esferização. Isto produz cristais não estressados e estabiliza as partículas

contra o ciclo de temperatura através das fases de transição cristalina. Reduz a quebra das esferas e a quantidade de agente de revestimento necessária (PESCE & JENKS, 1992).

4-Granulação: No processo de granulação do esferolizador, o nitrato de amônio fundido é pulverizado sobre o leito rolante de partículas sólidas no tambor, formando grânulos (PESCE & JENKS, 1992).

5-Acabamento: O produto da torre de esferolização é resfriado e peneirado (PESCE & JENKS, 1992).

3.c.4. Sulfato de amônio

Grande parte do sulfato de amônio disponível no mercado de fertilizantes é produzido como um subproduto de outros processos, como por exemplo no processo de produção de caprolactama e acrilonitrila, pois sua produção a partir de amônia sintética e ácido sulfúrico não tem sido economicamente favorável (ROY, 2007).

O processo de fabricação de sulfato de amônio, explicado a seguir, pode ser representado conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 12.

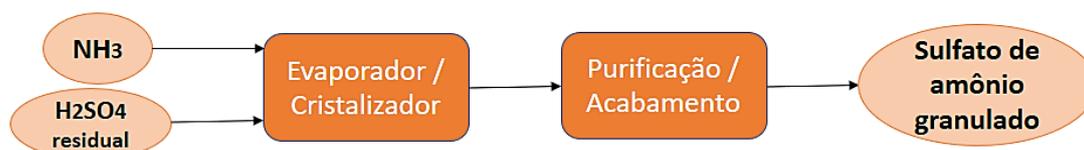


Figura 12 - Diagrama de blocos do processo de produção de sulfato de amônio a partir de ácido sulfúrico residual

Fonte: (ROY, 2007)

1-Evaporador/Cristalizadores: A solução de subproduto, rica em ácido sulfúrico residual é reagido com amônia sintética dentro dos evaporadores-cristalizadores aquecidos por vapor, para produzir o sulfato de amônio sólido. Neste caso, a produção de sulfato de amônio é um método de descarte de excesso de ácido de outros processos. (ROY, 2007).

2-Purificação / Acabamento: Após a cristalização, o sulfato de amônio sólido é separado do efluente por processos, como centrifugação e encaminhado para armazenamento (CNI, 2010).

Outra maneira de obter sulfato de amônio é a partir da reação de amônia gasosa efluente do forno de coque com ácido sulfúrico, conforme o processo apresentado no diagrama de blocos apresentado na Figura 13.

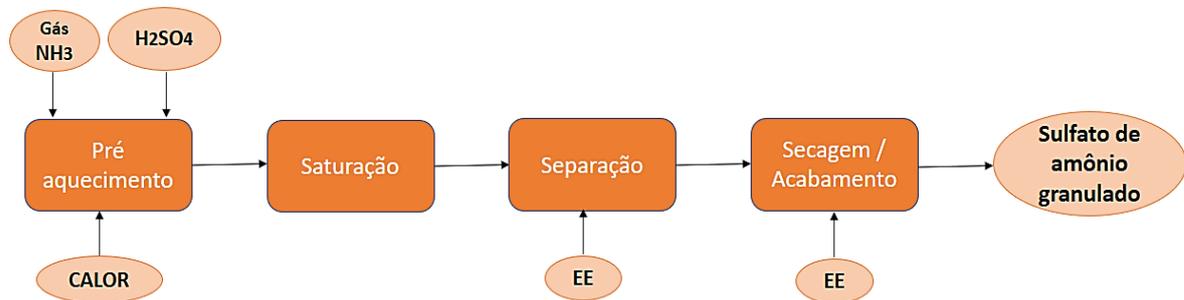
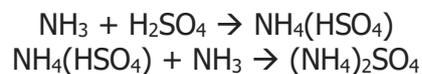


Figura 13 - Diagrama de blocos do processo de produção de sulfato de amônio a partir de gás de coque

Fonte: (ENGINEERS GUIDE, 2018)

1-Pré-aquecimento: O produto gasoso é alimentado em um pré-aquecedor, onde o gás atinge 60-70 °C, para depois alimentar o saturador (ENGINEERS GUIDE, 2018).

2 – Saturação: O saturador é sempre mantido com banho ácido chamado licor, que contém 4-5% de ácido sulfúrico. O gás de coque do forno entra através de um borbulhador que é mergulhado no banho, assim o fluxo de gás ascendente entra em contato com o licor mãe. Durante esse período, a amônia presente no gás reage com o ácido sulfúrico no licor formando o sulfato de amônio conforme as reações a seguir (ENGINEERS GUIDE, 2018).



O sulfato de amônio formado se instala no fundo do saturador, assim os cristais coletados são alimentados no tanque receptor de cristal (ENGINEERS GUIDE, 2018).

3 – Separação: A pasta de amônia do fundo do saturador é bombeada para o tanque receptor de cristal com fundo cônico, o cristal de sulfato de amônio assentea na porção cônica do tanque, sendo encaminhado posteriormente para centrífuga. A água mãe da parte superior do receptor é realimentada ao saturador (ENGINEERS GUIDE, 2018).

4 – Secagem: Os cristais após saírem da centrífuga são alimentados no secador. Esse equipamento é fornecido com ventilador de ar forçado e ar, aquecido no duto. Um espalhador na calha de alimentação do secador espalha a alimentação de ar em todas as direções. Após esse processo o sulfato de amônio granulado é encaminhado para armazenamento (ENGINEERS GUIDE, 2018).

3.c.5. Fosfato de diamônio (DAP) e Fosfato de monoamônio (MAP)

As principais etapas tanto da produção de DAP granulado quanto de MAP granulado, que se tornaram padrão nas indústrias, pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 14.

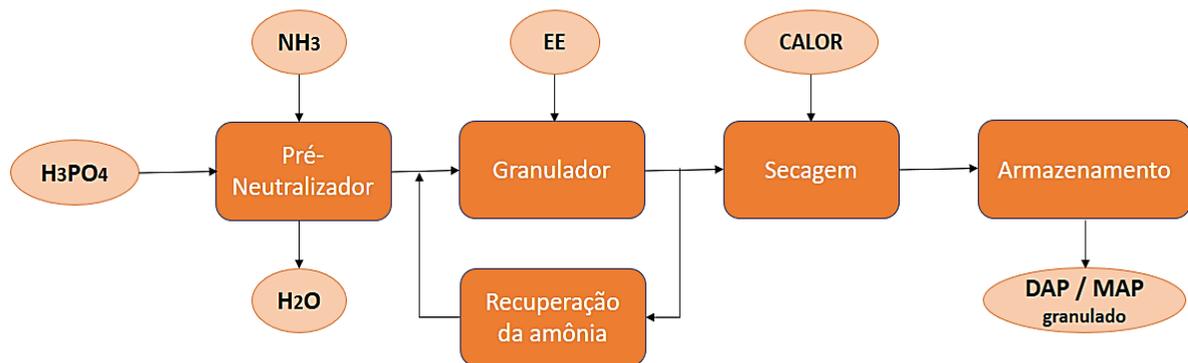


Figura 14 - Diagrama de blocos do processo de MAP / DAP granulado

Fonte: (ROY, 2007)

1-Pré-neutralizador: O ácido fosfórico, em processo úmido, com cerca de 40% de teor de óxido de fósforo (V) (P_2O_5) é alimentado a um recipiente de pré-neutralização. Nesse pré-neutralizador, a amônia anidra é expelida por tubos abertos projetados através das paredes (ROY, 2007).

Para produção de DAP é respeitada uma razão molar, para a neutralização do ácido, de 1,4 de NH_3 (amônia) para H_3PO_4 (ácido fosfórico). Essa mesma etapa na produção de MAP pode ser feita de duas formas, sendo a mais empregada a que utiliza a mesma razão de 1,4 entre NH_3 e H_3PO_4 . A outra opção consiste em utilizar uma razão molar de 0,6 de NH_3 para H_3PO_4 , tendo como resultado um sistema de fosfato de amônio de alta solubilidade (ROY, 2007).

Para ambos os casos, o calor gerado na reação é suficiente para evaporar uma quantidade considerável de água, até alcançar um teor de água entre 16 a 20%, e então a suspensão formada é bombeada controladamente para o granulador amoníaco (ROY, 2007).

2-Granulador: Tanto no processo de produção de DAP quanto o de MAP, a suspensão efluente do pré-neutralizador é distribuída em um leito rolante de sólidos reciclados, no granulador de amoníaco de tambor rotativo (ROY, 2007).

Entretanto, no processo que utiliza a razão molar de 1,4, a amônia é aspergida embaixo do leito para amonizar a polpa ainda mais perto da relação teórica de 2,0; a relação usual de acabamento de $NH_3 : H_3PO_4$ é de 1,85 - 1,94. E no processo que utiliza a razão molar de 0,6, a amônia é aspergida embaixo do leito para amonizar a polpa até a relação de 1,0 (ROY, 2007).

Esta amonização no granulador diminui drasticamente a solubilidade do fosfato de amônio, promovendo assim a solidificação e a granulação. A absorção de amônia não é 100% completa no pré-neutralizador ou no granulador. No entanto, a amônia não absorvida é recuperada em um circuito de lavagem (ROY, 2007).

3-Recuperação de Amônia: A amônia não absorvida é lavada com ácido fosfórico com teor de 30% de P_2O_5 . A reciclagem de sólidos para o tambor do granulador consiste em um tamanho menor do peneiramento do produto seco. Estes materiais junto ao produto seco são combinados e reciclados a uma taxa de 5 - 7 kg por quilograma de produto, e a variação desta taxa de reciclagem é o principal método para controlar a eficiência da granulação (ROY, 2007).

4-Secagem: O produto descarregado do granulador é seco com calor moderado até a temperatura do produto de 82 - 88 °C. Temperaturas de secagem mais altas devem ser evitadas por causa do ponto de fusão relativamente baixo do DAP (ROY, 2007).

5-Armazenamento: O produto com um teor de umidade de 1,5 - 2% possui excelentes propriedades de armazenamento e manuseio em sacos ou a granel (ROY, 2007).

3.c.6. Superfosfato simples (SSP)

Sua fabricação consiste em reagir rocha fosfatada pulverizada com ácido sulfúrico (H_2SO_4) em equipamento comparativamente simples, seguido por envelhecimento suficiente (cura) para completar a reação e melhorar a condição física, o processo de produção pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 15 (ROY, 2007).

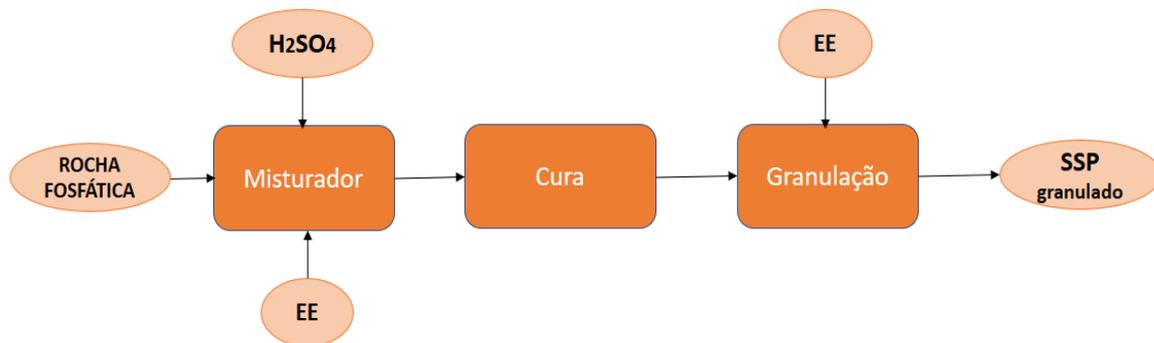


Figura 15 - Diagrama de blocos do processo de produção de SSP granulado

Fonte: (ROY, 2007)

1-Misturador: A rocha fosfatada pulverizada é misturada com ácido sulfúrico, geralmente é usado a proporção de 0,6 kg de ácido sulfúrico (base 100% H_2SO_4) por quilograma de rocha fosfática (30 - 32% de P_2O_5). A reação ácido-rocha converte a estrutura de apatita insolúvel em água da rocha em fosfato monocálcico solúvel (ROY, 2007).

2-Cura: O efluente do misturador é descarregado em uma cavidade, cuja finalidade é permitir que o tempo de reação ácido-rocha progrida e a condição física atinja um estado seco e friável (ROY, 2007).

As cavidades podem ser do tipo lote ou tipo contínuo. Uma cavidade contínua de esteira de ripas, comumente chamada de cavidade de Broadfield, é usada em muitos sistemas contínuos (ROY, 2007).

Nesse período o superfosfato irá se solidificando (fixando) e liberando gases que fazem com que a massa na cavidade se torne porosa e friável, de modo que possa ser "cortada" (desintegrada) e manuseada prontamente (ROY, 2007).

O SSP feito de rocha típica (30 - 32% de conteúdo de P_2O_5) será "fixado" em 40 - 50 min em uma cavidade contínua, enquanto o tempo ajustado em uma cavidade de lote é de 1,5 - 2 h. O superfosfato geralmente é mantido em pilhas de armazenamento (curadas) por 4 - 6 semanas, a fim de obter melhores propriedades de manuseio e permitir que as reações químicas continuem (ROY, 2007).

3-Granulação: A produção de SSP granular pode ser realizada com SSP curado ou diretamente das cavidades. O SSP é alimentado a um tambor rotativo ou granulador de bandejas equipado com um spray de água e / ou vapor. O granulado é seguido por um sistema de secagem e filtragem. O material excedente triturado é realimentado ao granulador (ROY, 2007).

3.c.7. Superfosfato triplo (TSP)

O superfosfato triplo (TSP) é produzido pela acidulação da rocha fosfática com ácido fosfórico (H_3PO_4), utilizando equipamentos e processos semelhantes aos do processo de SSP, o diagrama de blocos do processo pode ser visto na Figura 16 (ROY, 2007).

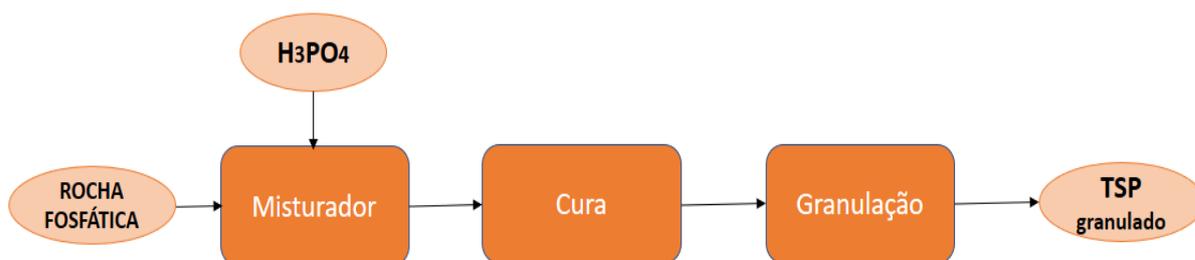


Figura 16 - Diagrama de blocos do processo de produção de TSP granulado

Fonte: (ROY, 2007)

1-Misturador: Como na produção de SSP, a reação ácido-rocha converte a estrutura de apatita insolúvel em água da rocha em fosfato monocalcico solúvel em água, através da mistura da rocha fosfatada pulverizada com ácido fosfórico ao invés do ácido sulfúrico, além disso para o preparo do TSP é utilizado rocha fosfática com teor de 45 - 46% de P_2O_5 . A proporção típica para produção de TSP é de 2,4 - 2,5 kg de P_2O_5 de ácido para cada kg de P_2O_5 da rocha (ROY, 2007).

2- Cura: O efluente do misturador é transportado por uma correia transportadora, que mantém a acidulação até que o TSP solidifique. O TSP não granular geralmente é curado 4 a 6 semanas antes do armazenamento ou usada no local (ROY, 2007).

3-Granulação: Em alguns processos o TSP curado ou direto das cavidades, como o SSP, são granulados em um tambor rotativo ou granulador de panela usando vapor e água para promover a granulação. O processo de granulação do tipo slurry é o processo de escolha dos principais produtores de TSP (ROY, 2007).

3.c.8. Cloreto de potássio

A única mina em operação no Brasil de produção de KCl (cloreto de potássio) utiliza minério de silvinita (KCl.NaCl) (PERALTA, 2015). A lavra e o processamento dos minerais de potássio seguem tradicionalmente três rotas: (i) Mineração subterrânea convencional seguida do processo de flotação (82% da produção mundial utiliza esse tipo de processo); (ii) Mineração por dissolução seguida da cristalização fracionada dos sais (12% da produção mundial); (iii) Evaporação solar a partir de salmouras, seguido de flotação ou com algumas variantes como separação eletrostática ou cristalização a frio (cerca de 6%) (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005). O processo de mineração subterrânea convencional seguida do processo de flotação, pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 17.

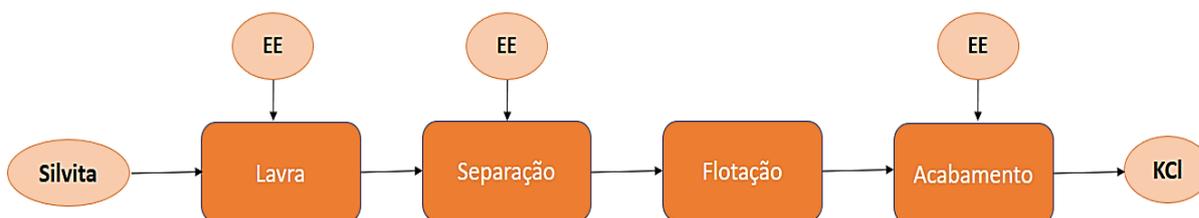


Figura 17 -Diagrama de blocos do processo de produção de cloreto de potássio

Fonte: (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005)

1-Lavra: No Brasil, é utilizado a técnica de “câmaras e pilares”. No processo de lavra são utilizadas máquinas mineradoras contínuas, cujos rotores têm capacidade de extrair até 19 t/min de minério potássico. As câmaras têm larguras que podem variar entre 18 e 23 m e comprimentos de mais de 914 m. Os pilares, blocos não minerados entre as câmaras, dão suporte para o teto superior da mina. Esse método só permite a extração de 45% do total (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005).

A mina de Taquari-Vassoras é composta de um poço principal, e um outro de serviço, com 5 m de diâmetro e 450 m de profundidade. A extração, feita por três mineradores contínuos do tipo Marietta, produz cerca de 1,16 t/min e um minerador de cabeça de corte do tipo Alpine com capacidade de produção de 0,7 t/min. A recuperação na lavra da mina é de 46% (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005).

2-Separação: O KCl é separado seletivamente do NaCl (cloreto de sódio) no minério silvinitico para produzir basicamente três granulações de produtos. A separação acontece a partir das operações de redução de tamanho das partículas do minério em britadores de impacto e moinhos de barras (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005).

3-Flotação: O minério deslamado segue para as unidades de flotação. A flotação da silvinita ocorre em uma solução saturada de KCl e NaCl. Para a flotação de sais pesados, a salmoura contém quantidades de sulfato e cloreto de magnésio (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005).

Numa típica flotação de silvinita, são utilizadas aminas primárias alifáticas de cadeias não-ramificadas na forma de seus cloridratos ou acetatos, como agentes que revestem as superfícies dos componentes a serem flotados. Alguns casos são utilizados misturas de aminas com cadeias hidrocarbônicas de vários comprimentos, para eliminar os efeitos causados por variações na temperatura da polpa. Os espumantes contribuem para a dispersão das aminas de cadeia longa, a estabilização e a distribuição homogênea das micelas. Em alguns sistemas de flotação, compostos polares, são usados para conferir maior hidrofobicidade à silvinita. Já os depressores são utilizados para minimizar o arraste do material argiloso até a zona de espuma (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005).

4-Acabamento: O produto da flotação é centrifugado, seco e adequado as especificações (NASCIMENTO, MONTE, & LOUREIRO, 2005).

3.d. Processos de produção principais do subsegmento Alcoolquímico.

O setor alcoolquímico é aquele que utiliza o álcool etílico (etanol) como matéria-prima para fabricação de vários produtos. Este é um potencial setor a substituir o petroquímico, utilizando o etanol no lugar do petróleo (EMBRAPA, 2018).

3.d.1. Eteno

No Brasil dentre as principais patentes publicadas de obtenção de eteno verde, destacam-se, uma da Petrobras, de 1983, e outra da Braskem, de 2011 (JERMOLOVICIUS, et al., 2017). O diagrama de blocos do processo pode ser visto na Figura 18.

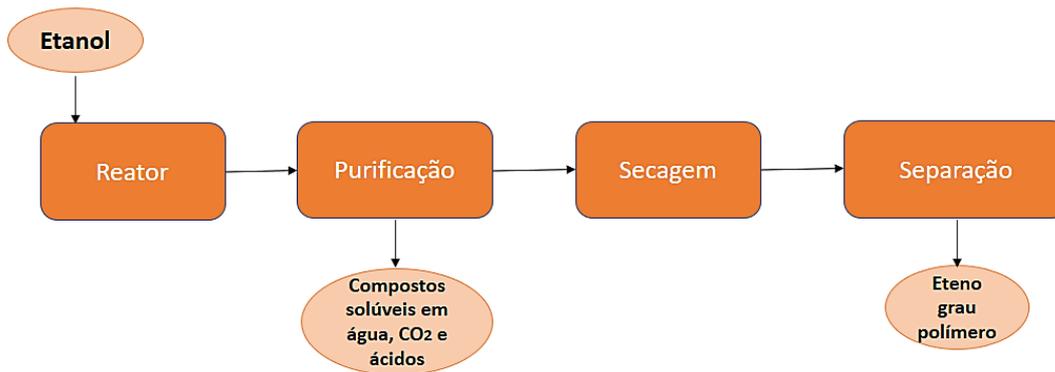


Figura 18 -Diagrama de blocos da produção de eteno a partir da desidratação do etanol

Fonte: (JERMOLOVICIUS, et al., 2017)

1-Reação: O etanol absoluto pré-aquecido na faixa de temperatura de 200 a 500 °C é alimentado no reator na presença de catalisador, usualmente o ácido sulfúrico, para desidratação em fase líquida, e alumina para fase vapor. A reação de desidratação de etanol a eteno é a apresentada a seguir (JERMOLOVICIUS, et al., 2017).



Os rendimentos em eteno publicados apresentam grandes variações dependendo do catalisador utilizado: 40% com catalisador de alumina, 50% com catalisador de óxido de cério, 41 % com zeólita HZSM5-25 e 99,8 % com zeólita HM20 (JERMOLOVICIUS, et al., 2017).

2-Purificação: Durante a reação de desidratação do etanol ocorre trinta e seis reações secundárias, com isso o efluente do reator, após ser resfriado, é alimentado por uma torre de absorção com água, eliminando compostos solúveis em água. Em seguida, o eteno passa por uma torre de absorção com solução de hidróxido de sódio (NaOH) para a remoção de gás carbônico e produtos ácidos (JERMOLOVICIUS, et al., 2017).

3-Secagem: Após a remoção de compostos solúveis em água e gás carbônico, o eteno passa por uma coluna de secagem, para remoção de água e posteriormente é encaminhado para separação (JERMOLOVICIUS, et al., 2017).

4-Separação: O eteno preparado é separado numa coluna de destilação, onde se obtém o eteno grau polimerização como corrente intermediária da coluna. No topo, separam-se os subprodutos leves e, no fundo, os pesados (JERMOLOVICIUS, et al., 2017).

3.d.2. Acetato de etila

No Brasil, assim como em várias regiões do mundo, é comumente utilizado o processo de esterificação para produção de acetato de etila, onde ocorre a reação reversível de etanol e ácido acético em presença de catalisador ácido (CHAZIN, 2012).

O processo de produção do ácido acético pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 19.

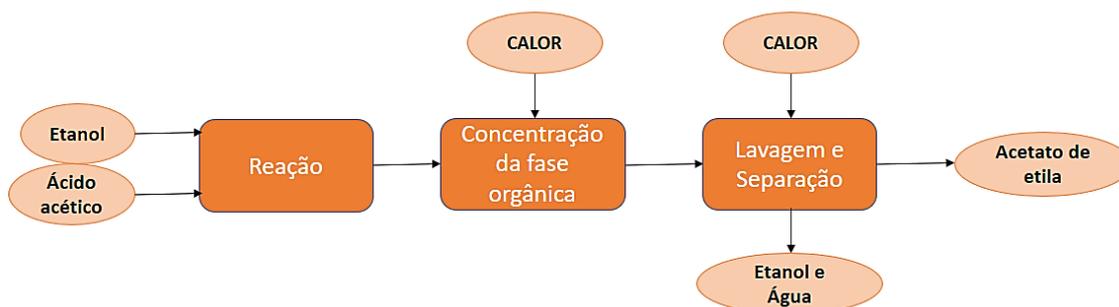


Figura 19 - Diagrama de blocos da produção de acetato de etila a partir do etanol

Fonte: (CHAZIN, 2012)

1-Reação: Os reatores, chamados de esterificadores, são alimentados com excesso de etanol concentrado em 95%, ácido acético e H_2SO_4 (ácido sulfúrico) concentrado. Após alcançar o equilíbrio, o acetato de etila bruto é transferido para o tanque intermediário (CHAZIN, 2012).

2-Concentração da fase orgânica: A mistura é aquecida, passa por uma coluna de refluxo e é enviada para uma coluna de esterificação. O topo desta coluna é aquecido a 80 °C e o vapor contendo etanol, acetato de etila e aproximadamente 10% de água é condensado e enviado para a primeira coluna de fracionamento. O topo desta coluna é aquecido a 70 °C e um azeótropo ternário é produzido com 83% de acetato de etila, 9% de etanol e 8% de água (CHAZIN, 2012).

3-Lavagem e separação: Esta mistura azeotrópica é enviada para um tanque onde é adicionada água para a formação de uma mistura de duas fases que, posteriormente, é separada por decantação no separador orgânico. A fase orgânica (superior) contém aproximadamente 93% de acetato de etila, 5% de água e 2% de etanol. Esta mistura é enviada para a segunda coluna de fracionamento e obtêm-se acetato de etila com pureza na faixa de 95-100% (CHAZIN, 2012).

3.d.3. Acetaldeído

Nesse processo utiliza-se o mecanismo de oxidação, também chamada de desidratação do etanol. O processo de produção pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 20.

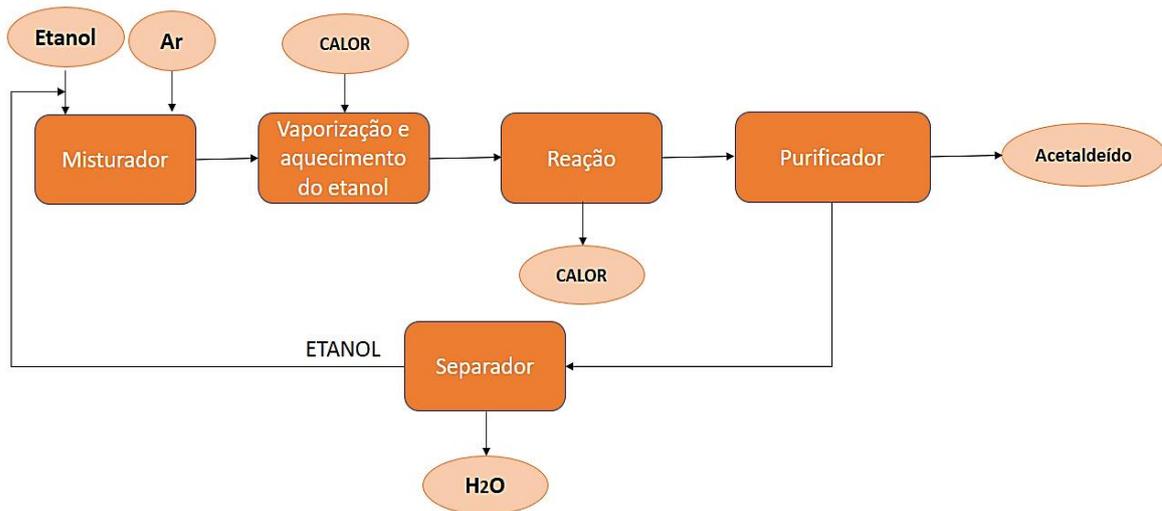


Figura 20 - Diagrama de blocos da produção de acetaldeído a partir da oxidação do etanol

Fonte: (Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries, 2013)

1-Misturador: O etanol do tanque de alimentação é bombeado e misturado na linha com ar (Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries, 2013).

2-Vaporização e aquecimento do Etanol: A mistura ar / etanol é alimentada em um pré aquecedor, onde ocorre a vaporização e aquecimento do etanol, a 280-300 °C. Em seguida, a mistura é aquecida novamente até alcançar a temperatura ao redor de 460-480 °C e é alimentada no reator multitubular (Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries, 2013).

3-Reação: Os tubos do reator são embalados com pellets de prata aleatoriamente, que atuam como catalisadores, então uma molécula de água é retirada do etanol com a ajuda de oxigênio e o catalisador gerando uma molécula de acetaldeído (Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries, 2013).

A reação é exotérmica e gera 242 KJ de energia por mol de formação de acetaldeído. A reação catalítica converte 75 a 80% de etanol em uma única passagem. A pressão de operação no reator está acima da atmosfera em torno de 2 a 5 atm. Operações de alta pressão não favorecem a formação de acetaldeído e os sistemas de purificação consomem mais energia (Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries, 2013).

4-Purificador: O etanol não reagido é separado por uma coluna de purificação e reciclado para o tanque de alimentação após a separação da água por um separador. O acetaldeído obtido é de cerca de 99% puro, este é bombeado para tanques de armazenamento (Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries, 2013).

3.d.4. Ácido Acético

No Brasil, o processo de produção de ácido acético é via a oxidação do acetaldeído, que por sua vez é produzido pela oxidação do etanol (SILVA, DUPIM, & CHAZIN, 2015). Esse processo pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 21.

Os processos mais conhecidos são os da Hoechst, Rhône Poulenc e Melle (que foi comprada pela Rhône Poulenc) (BAIÃO, 2015).

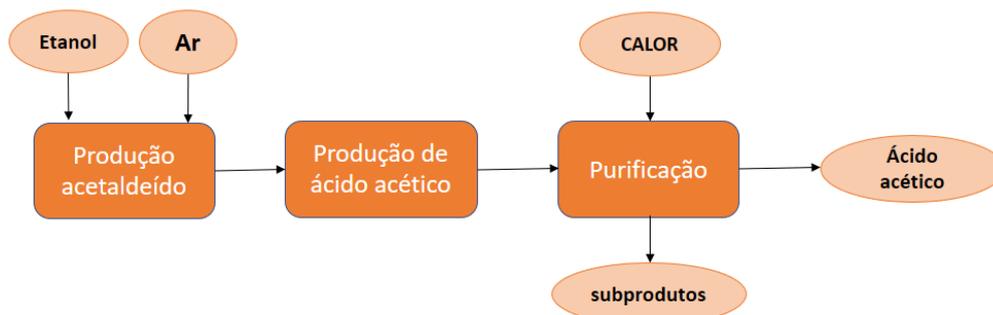


Figura 21 - Diagrama de blocos da produção de ácido acético a partir da oxidação do acetaldeído

Fonte: (BAIÃO, 2015)

1-Produção de acetaldeído: Processo usual para a produção de acetaldeído foi apresentado no item d.3.

2-Produção de ácido acético: O processo Hoechst, utiliza oxigênio como agente oxidante e opera continuamente a 50 – 70°C em torres de oxidação feitas de aço inoxidável utilizando ácido acético como solvente. São necessárias temperaturas de pelo menos 50°C para alcançar uma decomposição adequada do peróxido, um intermediário da reação, e, então, uma taxa de oxidação suficiente (BAIÃO, 2015).

O calor da reação é removido pela circulação da mistura por um sistema de resfriamento. Um controle cuidadoso da temperatura limita a decomposição oxidativa do ácido acético. A seletividade do ácido acético alcança 95-97% baseada em acetaldeído (BAIÃO, 2015).

Como uma alternativa à oxidação do acetaldeído com oxigênio, Rhône Poulenc/Melle Bezons desenvolveram um processo usando ar como agente oxidante. Seletividades similares às obtidas com oxigênio puro são alcançadas. No entanto, a grande quantidade de gases inertes na oxidação a ar é desvantajosa (BAIÃO, 2015).

3 – Purificação: Os produtos da reação são destilados e os gases são removidos. Além do CO₂ e do ácido fórmico como subproduto, estão incluídos acetato de metila, metanol, formato de metila e formaldeído (BAIÃO, 2015).

3.d.5. Butanol

No processo alcoolquímico o butanol é obtido por síntese de Guerbet, que pode ser resumida na desidrogenação de um álcool para formação do acetaldeído, que em seguida faz uma reação de condensação aldólica e sofre rehidrogenação nos produtos insaturados dessa condensação para formar longas cadeias de álcool como produto da reação (SIMÕES, 2016). O processo de produção pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 22.

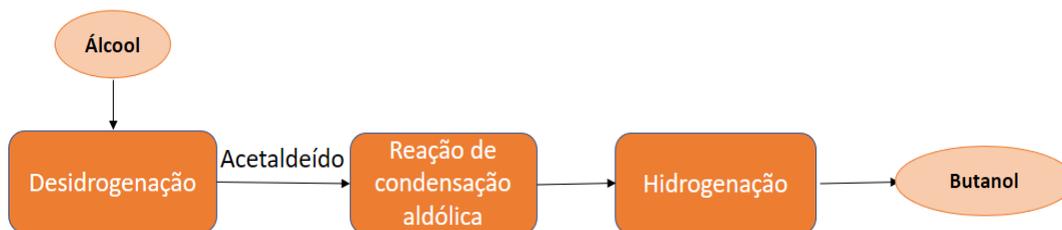


Figura 22 - Diagrama de blocos da produção de butanol

Fonte: (SIMÕES, 2016)

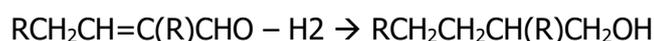
1 – Desidrogenação: Processo usual para a produção de acetaldeído foi apresentado no item d.3 (SIMÕES, 2016).



2 – Reação de condensação aldólica: Essa via ocorre entre duas moléculas que contêm espécie carbonila, ambos os álcoois envolvidos na reação de acoplamento devem ser desidrogenados. A reação aldol ocorre sobre catalisadores básicos, podendo ser de cobre ou óxidos mistos (IEB, 2003) (JEGATHISAN, 2014) (SIMÕES, 2016).



3 – Hidrogenação: Essa reação é realizada na presença de catalisadores, como o cobre ou o níquel, ou ao longo de um óxido de metal a temperaturas suficiente elevadas na presença de hidrogênio, tal como o álcool reagente (SIMÕES, 2016).



3.e. Processos de produção principais do subsegmento Gás-Químico

O setor gás-químico utiliza o gás natural como matéria-prima para fabricação de diversos produtos. Conhecido também como Química do C1, esse segmento utiliza

transformações do metano para produzir diferentes produtos químicos intermediários (NICACIO, 2014).

3.e.1. Eteno

O processo de craqueamento a vapor é o mais utilizado para a produção de eteno a partir de uma carga gasosa. Nesse processo é utilizado principalmente o etano para a obtenção do eteno. Em menor extensão também são empregados como alimentação o propano, o butano, ou uma mistura destes, como o GLP, mistura de etano-propano-butano. A vantagem de usar o etano é o alto rendimento de eteno com mínima formação de subprodutos (MEIRELLES, 2014).

Esse processo pode ser dividido em três partes principais: craqueamento/resfriamento, compressão e secagem (CHEMICAL ENGINEERING, 2015). O processo de produção pode ser visto no diagrama de blocos apresentado na Figura 23.

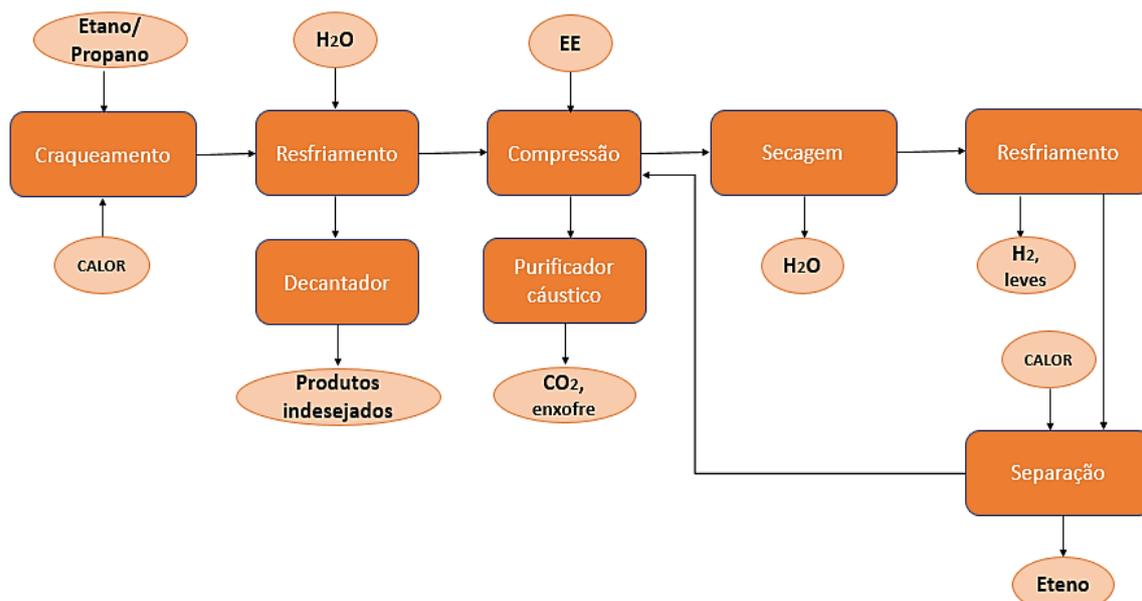


Figura 23 – Diagrama de blocos da produção de eteno via craqueamento a vapor a partir de etano e propano

Fonte: (CHEMICAL ENGINEERING, 2015)

1-Craqueamento: Uma mistura gasosa (etano / propano) é alimentada em fornos nos quais, sob condições de alta severidade, é craqueada, formando eteno, propeno e outros subprodutos (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

2-Resfriamento: A corrente de saída do forno é submetida a um resfriamento à base de água, para evitar novas reações e formação de subprodutos indesejáveis (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

Os produtos indesejados, os pesados, o vapor de diluição condensado, o alcatrão e o coque são removidos, através de um decantador a jusante da torre de resfriamento. O gás craqueado do resfriamento é então direcionado para a compressão e separação (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

3-Compressão: A compressão do gás craqueado é realizada em cinco etapas. Após o terceiro estágio de compressão, dióxido de carbono e enxofre são removidos do gás craqueado pela soda cáustica e lavagens com água em um purificador cáustico (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

4-Secagem: O gás craqueado comprimido é resfriado e posteriormente secado por peneiras moleculares que removem a maior parte da água (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

5-Resfriamento: O gás craqueado seco é alimentado a uma caixa fria para a remoção de hidrogênio e hidrocarbonetos leves, minimizando as perdas de eteno (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

6-Separação: Os condensados da bateria de resfriamento são alimentados para uma série de colunas de separação. Na primeira coluna (desmetanizador), o metano é obtido a partir do topo e posteriormente alimentado na caixa fria para remoção de hidrogênio, enquanto o fluxo inferior é alimentado para uma segunda coluna (desetanizador), na qual é recuperado principalmente eteno e etano no topo. Esse produto é alimentado em um conversor de acetileno e depois fracionado na coluna separadora de C2. Nesta coluna, os leves são removidos pelo topo e reciclados para o sistema de compressão, enquanto o eteno com grau polímero é extraído da coluna como um fluxo lateral. E o etano, a partir do fundo da coluna separadora de C2, é reciclado para os fornos de craqueamento (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

A corrente inferior da coluna desetanizador é alimentada a uma coluna despropanizador, que destila componentes C3 pelo topo. Esta corrente superior é cataliticamente hidrotratada para remoção de metilacetileno e propadieno, e depois alimentada a coluna separadora de C3. Nesta coluna, os leves são removidos pelo topo e reciclados para os compressores, enquanto o propeno com grau de polímero é retirado da coluna como um fluxo lateral. O propano do fundo do divisor C3 é reciclado para os fornos de craqueamento. Uma corrente C4+ é obtida a partir do fundo do despropanizador (CHEMICAL ENGINEERING, 2015).

3.e.2. Gás de síntese e Hidrogênio

Para produção de hidrogênio e gás de síntese, o processo mais utilizado e mais economicamente viável é a reforma a vapor do metano, contido no gás natural em elevados teores, por apresentar a vantagem de fácil separação dos produtos (CORTEZ, 2008).

O processo de reforma ocorre conforme esquematizado na Figura 24.

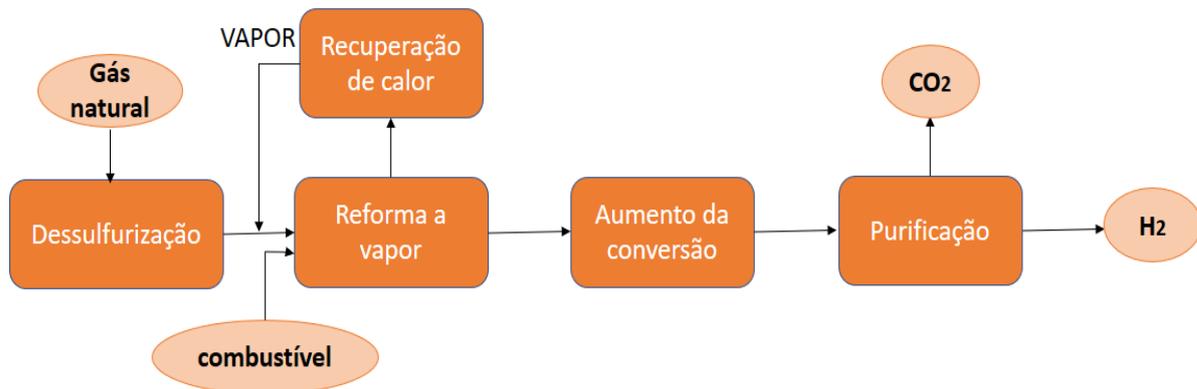
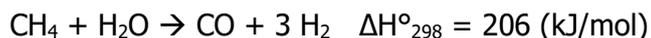


Figura 24 - Diagrama de blocos da produção de hidrogênio

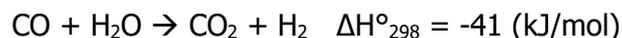
Fonte: (NIKOLAIDIS & POULLIKKAS, 2017)

1-Dessulfurização: O gás natural que contiver compostos de enxofre orgânico é submetido à etapa de dessulfurização para remoção de contaminantes de enxofre, prevenindo o envenenamento do catalisador (usualmente a base de níquel) na etapa de reforma (NIKOLAIDIS & POULLIKKAS, 2017).

2-Reforma a vapor: A reação de reforma do metano presente no gás natural ocorre a altas temperaturas e pressões de até 3,5 Mpa (NIKOLAIDIS & POULLIKKAS, 2017). Nessa etapa ocorre a conversão do metano em gás de síntese (mistura de monóxidos de carbono, hidrogênio e metano não reagido), conforme a reação apresentada abaixo (VASCONCELOS, 2006).



3- Aumento da conversão: Após o reformador, o vapor gerado passa por uma etapa de recuperação de calor, devido à reação de reforma altamente endotérmica. E o gás de síntese produzido é alimentado em um reator Shift, onde o CO (monóxido de carbono) reage com vapor para conversão em CO₂ (dióxido de carbono) e produção de H₂ adicional (VASCONCELOS, 2006; NIKOLAIDIS & POULLIKKAS, 2017), conforme a reação apresentada abaixo.



4-Purificação: Por último o CO₂ da mistura é removido em uma torre absorvedora e o CO₂ residual é convertido em metano, através do processo de metanação ou por adsorção por oscilação de pressão (PSA), conforme a reação apresentada abaixo, deixando H₂ com maior pureza próximo de 100% (VASCONCELOS, 2006; NIKOLAIDIS & POULLIKKAS, 2017).



4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO

4.a. Seleção da amostra da pesquisa

A seleção das amostras do atual segmento foi estabelecida dentro dos subsegmentos previamente estabelecidos conforme a subdivisão a seguir, uma vez que estes são independentes em relação aos dados de produção e consumo energético.

- Soda-Cloro
- Petroquímico
- Fertilizantes
- Alcoolquímico
- Gás-químico

Com isso, se estabeleceu um universo de empresas que estão produzindo atualmente e compõem cada subsegmento. No levantamento técnico do setor de químicos foi identificado um universo de 53 plantas industriais, com auxílio da ABIQUIM (Associação Brasileira de Química), que nos forneceu dados atualizados, como capacidades instaladas e produção física por empresa, do seu anuário de 2017.

Por outro lado, as informações sobre o consumo de energia é bastante reduzida, sendo em alguns segmentos quase nula, como ocorrido no subsegmento alcoolquímico, onde até o parâmetro da capacidade instalada é desconhecido na maioria das empresas. Dessa forma, não foi possível obter uma característica quantitativa que seja comum a todos os subsegmentos. O único critério possível a ser usado para o cálculo do tamanho amostral ótimo para esse estudo, foi a proporção à respeito ao número de empresas. Todavia, essa falta de informação no segmento químico nos indica a importância de obter, através desse estudo, dados básicos característicos de cada um dos subsegmentos do setor.

Sendo assim, foi usado a proporcionalidade relativa ao número de empresas para estimar uma aproximação do número de empresas representativo dentro de cada subsegmento, e finalmente foi estabelecido o tamanho amostral ótimo (14 empresas). Portanto, foi realizado 15 visitas tendo o objetivo de obter informações à respeito de todos os subsegmentos, a fim de alcançar uma rede de dados completa no final do estudo.

4.b. Seleção das etapas do processo de produção

Para fins de pesquisa de consumo energético serão consideradas as seguintes etapas de processo por subsegmento:

- Subsegmento soda-cloro:
 - Preparação da salmoura;
 - Eletrólise;
 - Compressão do cloro;
 - Resfriamento do cloro;
 - Evaporação da soda.

- Subsegmento petroquímico:
 - Craqueamento;
 - Compressão e secagem;
 - Purificação das olefinas;
 - Reação catalítica;
 - Purificação dos aromáticos.

- Subsegmento fertilizantes:
 - Dessulfirização;
 - Reforma a vapor;
 - Purificação do gás de síntese;
 - Síntese da amônia;
 - Síntese da ureia;
 - Purificação da ureia;
 - Granulação / Perolização.

- Subsegmento álcoolquímico:
 - Reação;
 - Purificação;
 - Separação.

- Subsegmento gás-Químico':
 - Craqueamento;
 - Compressão e secagem dos leves;
 - Separação.

4.c. Tratamento de dados

Todos os dados referentes aos consumos energéticos utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelas empresas visitadas.

Os dados utilizados são do ano de 2016 e 2017, tais quais: energia elétrica, produção, consumo de gás de processo, carvão vapor, óleo combustível e gás natural. Algumas informações foram estimadas pelas empresas pois elas não as tinham ou não faziam seu acompanhamento conforme o desenvolvido nesse estudo.

Para os subsegmentos que permitiram obter valores médio, realizou-se uma média simples dos valores das empresas que compunha cada subsegmento.

5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO

5.a. Subsegmento Soda-Cloro

5.a.i. Situação atual

Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

O setor soda-cloro é um subsegmento da química com pouca variação em relação ao seu processo produtivo, apresentando um processo relativamente simples e com as principais diferenças caracterizadas pelo tipo de tecnologia aplicada.

Esse processo de produção compreende pela passagem de uma corrente elétrica através de uma solução de salmoura (sal comum dissolvido em água) e células eletrolíticas. Os produtos gerados são cloro, soda cáustica (hidróxido de sódio ou NaOH) e o hidrogênio (H₂). Para cada tonelada de cloro, são produzidas 1,12 toneladas de soda cáustica e 30 kg de hidrogênio. Atualmente o mercado soda-cloro dispõe de três tecnologias de produção caracterizada pelo tipo da célula eletrolítica utilizada, podendo ser de diafragma, membrana ou mercúrio (ABICLOR, 2014).

Na 25 é apresentado o diagrama de blocos típico do cenário atual da indústria soda-cloro. Entretanto, algumas variações como a inclusão da mineração do sal e a exclusão das etapas de compressão e resfriamento do gás cloro podem ocorrer dependendo da atividade de cada empresa.

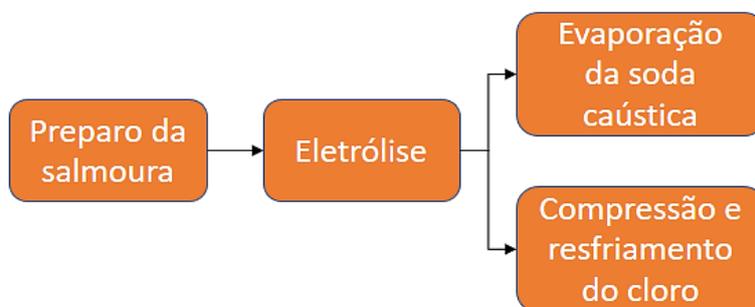


Figura 25 – Principais etapas de produção de soda-cloro no cenário atual

Fonte: Elaboração própria.

É importante ressaltar que uma forte tendência das empresas atuantes desse setor é utilizar o próprio hidrogênio gerado no processo como combustível. Sendo assim, as empresas possuem como destino do hidrogênio as seguintes opções: matéria-prima para produção de outros produtos químicos, venda e combustível para caldeiras e fornos.

Segue abaixo as finalidades energéticas presentes nas etapas do processo de produção.

- **Força Motriz:** Presente em todas as etapas, através de motores para funcionamento de máquinas.
- **Calor de Processo:** Presente na área de utilidades para geração de vapor que é utilizado no preparo da salmoura e evaporação da soda cáustica.
- **Refrigeração:** Presente no ciclo de refrigeração de cloro.
- **Iluminação:** Presente em todas as etapas, através das lâmpadas usadas para iluminação local.
- **Eletroquímica:** Presente na eletrólise para produção dos produtos.

Fontes de energia

A energia elétrica é o maior consumo energético utilizado nesse subsegmento devido ao uso exclusivo de eletricidade nas células eletrolíticas (eletrizadores), coração do processo de produção de soda-cloro, além do acionamento de motores, como compressores, ventiladores e bombas e iluminação.

A energia térmica é utilizada majoritariamente na evaporação da soda cáustica e no aquecimento da salmoura. O principal energético térmico é o hidrogênio formado durante o processo de eletrólise associado ao gás natural que atendem juntos a demanda energética. É importante ressaltar que embora o hidrogênio seja representativo como energético nesse setor, este não foi considerado na análise visto que não é tratado como energia primária e nem no consumo final de acordo com a metodologia do Balanço Energético Nacional (BEN).

Predominantemente as empresas são altamente consumidoras de energia elétrica, e devido ao alto impacto do seu custo nas operações, as informações relacionadas ao custo da eletricidade são mantidas sob grande sigilo.

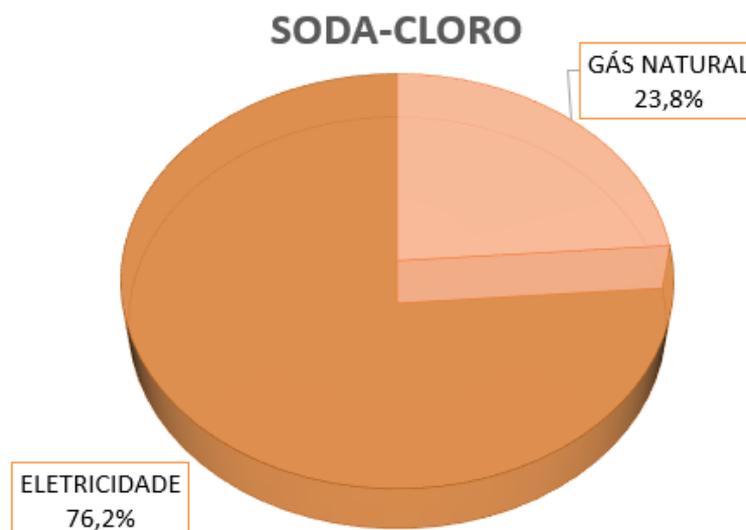


Gráfico 20 – Consumo energético do subsegmento de soda-cloro

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados de campo.

Principais equipamentos consumidores de energia

De acordo com os dados coletados, o consumo de energia total das plantas visitadas apresenta a média de 82.946,4 tep/ano para energia elétrica e 27.766,8 tep/ano para energia térmica.

Nesse cenário pode-se indicar como os maiores equipamentos consumidores de energia elétrica:

- Células eletrolíticas;
- Compressores de cloro;
- Compressores de fluido refrigerante;

E os principais equipamentos que consomem energia térmica:

- Evaporadores de soda cáustica;
- Diluição e pré-aquecimento da salmoura;
- Caldeiras;

Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria soda-cloro apresenta consumo específico médio de energia elétrica em 0,27860 tep/t de cloro (3.239,5 kWh/t, variando de 2.690,8 a 3.743,0 kWh/t) e 0,08702 tep/t de cloro (3,64338 GJ/t, variando de 1,78887 a 5,82555 GJ/t) em energia térmica, estimados por média ponderada pela produção de cada planta.

Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, a Tabela 10 apresenta os valores obtidos:

<i>FONTES DE ENERGIA</i>	<i>RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)</i>						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	88,5%	-	-	-	-	-
Eletricidade	86,3%	-	-	77,2%	62,3%	67,9%	-

Tabela 10 - Rendimento energético atual, subsegmento de soda-cloro

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Eletroquímica:

A indústria de soda-cloro monitora e acompanha diariamente o consumo energético específico das células eletrolíticas. Este consumo específico é comumente definido

como kWh/ tonelada de produto. Para se definir o rendimento energético neste processo foi necessário a definição do rendimento da eletrólise em si.

Para isto adotou-se o rendimento de 95% como sendo o rendimento da tecnologia mais energeticamente eficiente que se tem conhecimento (KIROS & BURSELL, 2008) a tecnologia ORR (*Oxygen Reduction Reaction*). Embora já ofertada comercialmente pela Thyssen Krupp (THYSSENKRUPP a, 2018), essa tecnologia ainda se encontra em estágios iniciais de desenvolvimento, portanto, com pouco alcance de mercado e reduzida capacidade instalada até o momento. De acordo com as referências supracitadas, estima-se que a tecnologia ORR seja de 20 a 30 % mais eficiente do que a tecnologia de membrana, a mais energeticamente eficiente das tecnologias maduras atualmente disponíveis.

Desta forma, partindo-se da premissa de que ORR com eficiência de 95% é a tecnologia mais eficiente e que a eletrólise a partir de membranas é 25% menos eficiente, definiu-se que o rendimento potencial da eletroquímica a partir de eletricidade neste relatório será de 71% representando a eficiência estimada máxima da tecnologia de membrana.

Refrigeração:

Rendimentos de sistemas de refrigeração são normalmente medidos sob o conceito de COP (coeficiente de performance) que é a quantidade de energia (frio) entregue dividida pela quantidade de eletricidade consumida. O COP é invariavelmente maior que 1 e varia muito conforme a diferença de temperatura entre o processo e o ambiente.

A Tabela 11 mostra o número de COP teóricos para diferentes faixas de temperatura.

APLICAÇÃO	FLUIDO REFRIGERANTE	T_K	T_W	COP CARNOT	COP TEÓRICO	RENDIMENTO TEÓRICO	COP REAL	RENDIMENTO REAL
Bomba de calor ar-água	R290	2,0	35,0	9,34	7,61	0,81	3,2	0,34
Ar condicionado residencial	R410A	26,07	35,0	35,98	31,58	0,88	3,01	0,08
Sala refrigerada	R134a	5,0	32,0	10,30	8,91	0,87	1,85	0,18
Sala refrigerada - Freezer	R404A	-18,0	32,0	5,10	3,58	0,70	1,12	0,22

t_k – Temperatura da área refrigerada e t_w – temperatura do ambiente.

Tabela 11 - Fator COP e Carnot do ciclo de Carnot ideal, ciclo teórico e os sistemas de refrigeração disponíveis em diferentes aplicações

Fonte: (DANFOSS, 2010)

Adotou-se o COP teórico de 8,91 para áreas refrigeradas de 5 °C e ambiente de 32 °C que representa bem as condições de operação encontradas em sistemas de refrigeração industrial objeto deste estudo (DANFOSS, 2010).

Para determinar o rendimento potencial de sistema de refrigeração, realizou-se uma pesquisa entre fabricantes e encontrou-se uma oferta por parte da empresa TRANE, onde anuncia que seus sistemas de refrigeração atingem um consumo específico de 0,478 kWh por tonelada de refrigeração (TR) (TRANE, 2018). A relação entre COP e consumo específico pode ser observada na Equação 1. Portanto, o COP potencial é de 2,092 TR/kWh.

$$COP POTENCIAL \left(\frac{TR}{kWh} \right) = \frac{1}{CONSUMO ESPECÍFICO POTENCIAL \left(\frac{kWh}{TR} \right)}$$

Equação 1 – Cálculo do COP potencial

Sabendo-se que 1 TR equivale a 3,51 kWh chega-se a COP potencial de 7,343 kWh/ kWh, conforme mostra a Equação 2.

$$COP POTENCIAL \left(\frac{kWh}{kWh} \right) = COP POTENCIAL \left(\frac{TR}{kWh} \right) \times \frac{3,51 kWh}{1 TR}$$

Equação 2 – Cálculo de conversão de unidade

Com esse valor foi possível estimar o rendimento potencial do sistema de refrigeração através da 3. Desta forma adotou-se o rendimento de 82%.

$$RENDIMENTO POTENCIAL (\%) = \frac{COP POTENCIAL}{COP TEÓRICO} \times 100\%$$

Equação 3 – Cálculo do rendimento potencial de refrigeração

Coeficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, a Tabela 12 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	100,0%	-	-	-	-	-
Eletricidade	9,5%	-	-	3,9%	0,9%	85,7%	-

Tabela 12 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento de soda-cloro

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo.

Cogeração:

Em plantas onde há cogeração de eletricidade existe a necessidade de estimar o consumo final deste tipo de combustível para o processo de produção em si, descontando-se a contribuição para a geração de eletricidade.

Desta forma para estimar o consumo de combustíveis para consumo final do processo de fabricação, adotou-se o padrão estabelecido pela nota técnica Coben 08/93.

Sendo assim, foi adotado o rendimento médio de 50% para a geração de eletricidade a partir da planta de cogeração, estimando-se a quantidade de combustível destinado exclusivamente à cogeração de eletricidade (COBEN, 1993). Dessa forma, foi possível estimar a quantidade de combustível utilizado no processo de fabricação (uso final), através da Equação 4.

$$COMBUSTÍVEL PARA USO FINAL = COMBUSTÍVEL TOTAL - COMBUSTÍVEL PARA GERAÇÃO$$

Equação 4 – Cálculo da quantidade de combustível utilizado

É importante ressaltar que estes cálculos afetam diretamente os coeficientes de destinação apontados acima.

Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, foram realizadas aproximações e estimativas com o intuito de obter valores indicativos para o custo de reposição dos equipamentos selecionados:

Células eletrolíticas:

Para a definição do custo estimado da tecnologia atual, no caso da tecnologia membrana foi utilizado valor informado durante a visita e para as tecnologias diafragma e mercúrio, utilizou-se como referência a Tabela 13 que informa custos estimados para a instalação de uma planta de produção de cloro com base na tecnologia de diafragma. Como não foi encontrado na literatura custos de instalação de plantas com tecnologia mercúrio, então adotou-se os mesmos custos da tecnologia diafragma.

	MÉDIA DE CUSTO TOTAL (10⁶\$)
Células	25,5
Utilidades	22,5
Sobrecarga	11,7
Engenharia	11,7
Evaporação cáustica	8,3
Purificação da salmoura	7,5
Diversos	6,7
Coleta de cloro	6,5
Armazenamento cáustico	5,4
Retificadores	3,4
Coleta de hidrogênio	2,0
Total	111,0

Tabela 13 – Custo estimado para implementação de uma planta produtora de 500 toneladas de cloro por dia tecnologia diafragma (10⁶\$ 1990)

Fonte: (KHURSHEED, MANSFIELD, DEPRO, & PERRY, 2000)

Como pode ser observado, a Tabela 13 foi elaborada em 1990. Para se estimar os custos atuais utilizou-se a média anual da inflação norte-americana entre 1990 e 2018 resultando em 2,37% (Inflation Calculator, 2018).

Motores elétricos:

Como estimativa de custo para reposição de motores foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a, 2018).

Como a ferramenta disponibilizada pela WEG é limitada a motores até 400 kW, para estimativa de custo de motores acima de 400 kW foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5.

$$C2 = C1 \times \left(\frac{Q2}{Q1}\right)^N$$

Equação 5 – Estimativa de custo de motores

Onde: C1 – custo do equipamento com capacidade Q1; C2 - custo do equipamento com capacidade Q2 ; Q1 – capacidade 1; Q2 – capacidade 2; N – depende do tipo de equipamento ou planta. Nesse trabalho foi adotado N = 0,77, típico para motores (PERRY, 1997).

A seguir encontra-se a premissa usada para estimativa de custo;

Idade do motor: Adotou-se o ano de partida da planta como ano base e assumiu-se que após 30 anos os motores foram substituídos. O período resultante foi então imputado na ferramenta online da WEG que determinou automaticamente o número estimado de rebobinagens, bem como o custo atual do motor.

Troca de lâmpadas por tecnologia LED:

Adotou-se o critério de payback simples para estimativa do investimento necessário para substituição por LED. Desta forma com base na economia estimada calculou-se o investimento para atender o payback típico de 4 anos. O custo para repor tecnologia atual (um mix entre incandescente e fluorescente compacta) adotou-se metade do custo da tecnologia LED.

5.a.2. Situação com tecnologias mais eficientes

Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas de processo produtivo, no cenário alternativo, continuarão sendo as mesmas.

No consumo elétrico, em geral, a utilização de motores de alto rendimento, adequação dos sistemas motrizes quando mal dimensionados e uso de iluminação a LED podem ser destacados como oportunidades de eficiência energética, além da substituição das tecnologias da eletrólise por tecnologia membrana.

As medidas propostas podem ser observadas na Tabela 14.

MEDIDAS DE MELHORIAS NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
Elétricas	Troca de células eletrolíticas de diafragma para membrana
	Troca de células eletrolíticas de mercúrio para membrana
	Troca/Manutenção de motor
	Troca de lâmpadas por LED
	Inversor de Frequência
	Sistema de cogeração de eletricidade

Tabela 14 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de soda-cloro

Fonte: Elaboração própria

Onde cada medida é caracterizada por:

Troca de células eletrolíticas para tecnologia membrana

A principal medida de conservação de eletricidade na produção de soda-cloro encontra-se na escolha da tecnologia da eletrólise. A tecnologia de membrana é cerca de 20% mais eficiente quando se considera o ciclo de produção completo, incluindo

a energia necessária para evaporação da soda, em relação as outras tecnologias de produção, diafragma e mercúrio (EURO CHLOR, 2010).

Sabendo-se que a soda cáustica para comercialização apresenta concentração de 50%, outro fator de melhoria na utilização da tecnologia de membrana é o reduzido consumo de vapor para concentração da soda, uma vez que esta sai da eletrólise com concentração de 20-30% enquanto que na tecnologia diafragma a concentração é de apenas 10-15%.

Outro importante aspecto no tocante à substituição da tecnologia mercúrio por membrana é o reduzido impacto ao meio ambiente devido à contaminação por mercúrio, que embora sendo controlada de maneira intensiva, perdas eventualmente existem.

Em termos de novas e emergentes tecnologias, o processo de ORR (*Oxygen reduction Reaction*), comercialmente conhecido como OCD (*Oxygen Depolarized Cathodes*) atualmente sendo ofertado pela Thyssen-Krupp promete entregar uma economia de energia de cerca de 25% sobre o já eficiente processo de eletrólise com tecnologia membrana (THYSSENKRUPP a, 2018). Até o momento apenas uma planta em escala comercial encontra-se em operação na China com capacidade instalada de 35.500 toneladas Cl₂ por ano (THYSSENKRUPP b, 2018). Uma diferença chave deste processo é que nele a produção de hidrogênio é suprimida através da redução eletroquímica do íon do oxigênio das hidroxilas.

Troca / Manutenção de motor

A alteração dos motores mais antigos por outros de alto rendimento é uma medida para melhoria da eficiência da planta, porém não alterando o fato de que ainda continuarão como maiores consumidores elétricos.

Outro ponto importante relacionado a motores é o uso de *soft-starters*, tecnologia muito difundida, que aumenta o desempenho e vida útil das máquinas, também reduzindo o consumo de energia.

Troca de lâmpadas por tecnologia LED

O uso de tecnologia LED pode reduzir em 50% o consumo de energia (Büll, 2015). Portanto, é aconselhável, onde possível, a total alteração do sistema de iluminação das unidades por lâmpadas de tecnologia LED. A estimativa de economia com a migração do sistema de iluminação para 100% LED foi feita considerando uma redução de 30% no consumo de eletricidade destinada a iluminação das plantas, visto que a maior parte do segmento já apresenta uma fração da iluminação com essa tecnologia.

Instalação de inversor de frequência

O fluxo total do compressor é uma soma do fluxo que ele envia para o processo e o fluxo de reciclagem (ou sopro) através da válvula anti-surto. A maneira mais eficiente de diminuir o uso de energia do compressor, é o controle anti-surto dinâmico e preciso, desde a medição até o algoritmo de controle até a válvula anti-surto. Saber onde você está em relação região de surto e quão rápido você pode responder define a margem de segurança necessária. Uma resposta rápida permite uma operação segura mais próxima da linha de surto. Essa abordagem protege o compressor contra surtos com uma abertura mínima possível da válvula anti-surto, consideravelmente economizando energia (EMERSON ELECTRIC Co, 2016).

Portanto, para compressores superdimensionados encontram-se oportunidades de instalação de um controle anti-surto dinâmico, bem como instalação de inversores de frequência para controle de velocidade no equipamento.

Re-potencialização do sistema de vapor / Cogeração

A re-potencialização do sistema de vapor em plantas que não possuem turbinas a vapor e, portanto, não são capazes de gerar eletricidade, é uma opção atraente que aproveita de maneira mais eficiente o conteúdo energético dos gases de processo, como o hidrogênio gerado durante a produção de cloro-soda.

Nesta medida, plantas que possuem caldeiras de baixa pressão usadas exclusivamente para atender ao consumo de energia térmica, principalmente no sistema de evaporação da soda, podem fazê-lo através da geração de vapor a alta pressão e temperatura, roteando este fluxo energético através de uma caldeira de contrapressão que aproveitará o conteúdo energético do vapor de alta qualidade convertendo-o em eletricidade antes de ser entregue como vapor de baixa pressão à rede de distribuição.

Sistemas de cogeração, em outras indústrias, eventualmente encontram obstáculos para dar destino à eletricidade gerada. Entretanto, na indústria de soda-cloro, o consumo de eletricidade é de tamanha grandeza que absorve por completo a geração de eletricidade interna, o que reduz o custo com eletricidade da planta.

Adicionalmente, em plantas que vislumbram o aumento de sua capacidade de produção e encontram-se limitadas pela capacidade das linhas de transmissão de alta tensão, um sistema de cogeração pode vir a diminuir a necessidade de investimentos na interligação com a rede elétrica.

É importante destacar que as plantas possuem um nível avançado de automação, porém há espaço para sistemas de coleta de dados apoiado por maior nível de medidores on-line para facilitar diagnósticos e identificar melhorias nos processos de produção levando a acréscimos percentuais na eficiência energética das plantas.

Em plantas com sistemas de cogeração de eletricidade suportados pela produção de hidrogênio, onde rotas para sua comercialização não se encontram disponíveis, existe a oportunidade de re-potenciação do sistema de cogeração através da instalação de caldeiras de alta pressão e alta temperatura, além de turbinas a vapor de contrapressão, aproveitando assim o conteúdo energético do combustível de maneira mais eficiente.

Fontes de energia

No cenário alternativo, continuarão sendo usados os mesmos energéticos. Energia elétrica para eletrólise, iluminação e força motriz, e gás natural para geração de vapor e cogeração.

Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores continuarão sendo os mesmos, porém com as medidas de eficiência aplicadas.

Indicadores energéticos

Em função da troca da tecnologia no sistema de produção para células eletrolíticas com tecnologia membrana, troca da iluminação para tecnologia LED, utilização de motores de alta eficiência e re-potencialização do sistema de cogeração, além de ações de gestão que permitem uma otimização do consumo energético, seja por dimensionamento ou operação diferente da projetada, o consumo específico médio mais eficiente para o subsegmento de soda-cloro é de aproximadamente 0,28943 tep/t de cloro.

Nesse cenário mais eficiente, a energia elétrica tem um consumo específico médio de aproximadamente 0,20667 tep/t (2.403,2 kWh/t). E a energia térmica um consumo específico médio de aproximadamente 0,08277 tep/t.

Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a Tabela 15 apresenta as melhores referências identificadas no segmento de soda-cloro:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	93,0%	-	-	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	82,0%	85,0%	95,0%	-

Tabela 15 - Rendimento energético alternativo, subsegmento de soda-cloro

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; conhecimento do consultor; (WEG b, 2018; HTL Brasil, 2018; DANFOSS, 2010; KIROS & BURSELL, 2008)

Coeficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a Tabela 16 apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional das plantas industriais dessa pesquisa.

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	100,0%	-	-	-	-	-
Eletricidade	10,8%	-	-	4,9%	0,9%	83,3%	-

Tabela 16 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento de soda-cloro

Fonte: Elaboração própria com base nas medidas de eficiência energética aplicadas sobre os dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

A Tabela 17 apresenta medidas de eficiência energética identificadas para o setor de soda-cloro. Para cada medida são apresentados os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por tonelada produzida.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS ODE MELHORIA	INVESTIMENTO ATUAL ¹ (R\$/ton produzida)	INVESTIMENTO MAIS EFICIENTE ¹ (R\$/ton produzida)	ECONOMIA DE ENERGIA ² (%)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/Ton Produzida)
Célula eletrolítica - Mercúrio	1.412,77	1.954,23	9,31%	0,02035
Célula eletrolítica - Diafragma	1.984,22	3.718,21	1,56%	0,00423
Troca/Manutenção de motor	5,52	6,84	5,45%	0,00130
Troca de lâmpadas por tecnologia LEDs	2,81	5,62	23,31%	0,00056
Instalação de inversor de frequência	1,18	1,91	2,00%	0,00039
Sistema de cogeração de eletricidade	-	184,48	14,80%	0,04287

¹ Para equipamentos em valores dólar americano fora considerado a taxa do dólar do dia 17/06/2018 R\$3,70 (<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?id=txcotacao>).

² Economia de energia / consumo final de energético do respectivo serviço e fonte energética.

Tabela 17 - Investimento na situação melhorada - soda-cloro

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; (WEG a, 2018; EURO CHLOR, 2010; IEA, 2005; PERRY, 1997)

Embora a medida de substituição das células eletrolíticas, mercúrio e diafragma por membrana seja uma das principais medidas de setor, totalizando 10,87% de economia de energia. É importante ressaltar que economicamente a substituição da

tecnologia diafragma por membrana não é viável devido ao elevado tempo de *payback*.

Onde cada medida é caracterizada por:

Troca de células eletrolíticas para tecnologia membrana

Das três tecnologias indústrias disponíveis para produção de soda-cloro: mercúrio, diafragma e membrana. Esta última apresenta benefícios significativos de eficiência energética e produtividade. Desta forma, foi estimado o custo para a substituição das tecnologias de mercúrio e diafragma pela tecnologia de membrana, por se tratar de uma alternativa interessante sob o ponto de vista de eficiência energética.

O comprometimento de recursos para a alteração da tecnologia de produção para células eletrolíticas com membranas é considerável. De acordo com depoimentos colhidos nas visitas, estima-se que o custo para implementação de uma planta de cloro com tecnologia membrana é de cerca 12,5 dólares / tpa (tonelada por ano). Naturalmente, retorno sobre este investimento se dá não somente com a redução no custo da eletricidade, mais também no ganho de espaço na planta, podendo utilizar mais células eletrolíticas e conseqüentemente o aumento da produção, uma vez que a unidade de membranas ocupa cerca de 30% do espaço necessário para uma planta com base em tecnologia de diafragma ou mercúrio.

Troca / Manutenção de motor

Assim como foi feito para estimativa do custo de reposição de motores com tecnologias atuais, também foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, para motores de alta eficiência, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a, 2018). E para estimativa de custo de motores acima de 400 kW também foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5.

Nessa estimativa foi utilizada as mesmas premissas mencionadas para situação atual, que permite determinar o número estimado de rebobinagens, o custo do motor de alta eficiência e ganho de eficiência em percentual de redução no consumo de eletricidade.

O percentual de economia varia de acordo com a potência do motor e sua aplicação. A seguir é mostrado um exemplo para um motor de 400 kW:

INDICADORES	MOTOR STANDARD (ANTIGO)	MOTOR ALTO RENDIMENTO (NOVO)
Horas de operação / ano	7008 (80% fator utilização)	
Idade do motor	30	
Número estimado de rebobinagens	4	
Redução no consumo de energia elétrica (kWh/ano)	~340 mil	
Economia de energia elétrica (%)	13.64%	
Retorno sobre o investimento (ROI)	15 meses	

Tabela 18 - Eficiência energética em motores elétricos

Fonte: (WEG a, 2018)

Troca de lâmpadas por tecnologia LED

Esta estimativa foi realizada com base no payback simples típico de 4 anos para migração do sistema de iluminação (ARQUILED, 2018).

Instalação de inversor de frequência

O investimento necessário para a instalação de inversor de frequência foi considerado como sendo 30%⁴ do valor do motor novo.

Re-potencialização do sistema de vapor / Cogeração

O custo para instalação de um sistema de cogeração é estimado em 700 dólares/kW (IEA, 2005). A potência instalada foi estimada com base na produção de vapor atual, sendo assim considerou-se que o consumo de combustível não se altera de maneira significativa. Atribuiu-se valores de pressão e temperatura de vapor a alta pressão e temperatura e estimou-se a capacidade de geração de eletricidade da turbina com base em eficiência isentrópica de cerca de 85%. Dessa forma a turbina entrega vapor na saída em condições similares de pressão e temperatura que a planta já utiliza.

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, a Tabela 19 pode ser observado o potencial de economia do processo de produção do subsegmento soda-cloro.

FONTE DE ENERGIA (tep/t)	FORÇA MOTRIZ	CALOR DE PROCESSO	REFRIGERAÇÃO	ILUMINAÇÃO	ELETROQUÍMICA	TOTAL (%)
Gás natural	-	0,00425	-	-	-	4,88%
Eletricidade	0,00254	-	0,00064	0,00068	0,06808	25,82%
Total	9,59%	4,88%	5,81%	26,75%	28,53%	20,84%

Tabela 19 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento soda-cloro

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo.

⁴ Experiência do consultor.

5.b. Subsegmento Petroquímico

5.b.1. Situação atual

Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

O setor petroquímico é um subsegmento de química com pouca variação em relação ao seu processo produtivo, principalmente se for levado em consideração as duas etapas principais, reação e fracionamento. Possíveis variações no processo ocorrem devido as matérias-primas utilizadas e a finalidade do processo, ou seja, o produto que deseja-se alcançar.

A produção de olefinas no Brasil se dá unicamente através da tecnologia de reforma catalítica, através de fornos de pirólise a vapor. Majoritariamente a nafta petroquímica é a matéria-prima. Neste subsegmento, abordaremos o processo base nafta produzindo eteno, propeno, buteno, butadieno e os compostos do grupo BTX (benzeno, tolueno e xileno).

Na Figura 26 é apresentado o diagrama de blocos típico do cenário atual da indústria petroquímica.

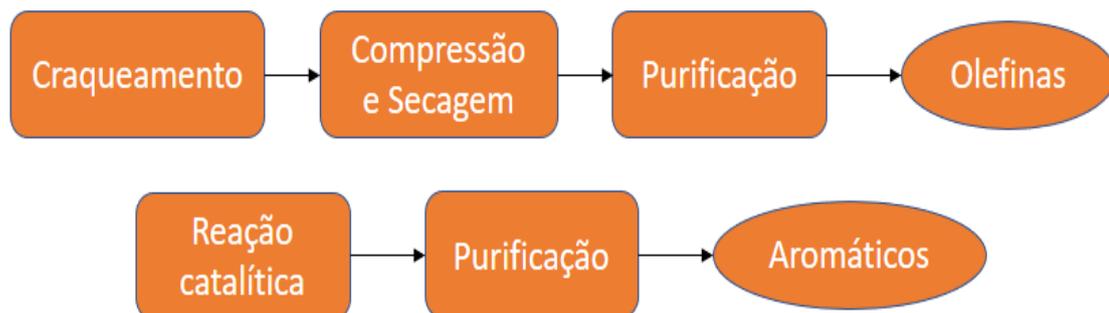


Figura 26 - Principais etapas de produção dos produtos petroquímicos básicos no cenário atual

Fonte: Elaboração própria

Segue abaixo as finalidades energéticas presentes nas etapas do processo de produção.

- **Força Motriz:** Presente em todas as etapas, através de motores para funcionamento de máquinas.
- **Aquecimento Direto:** Presente na etapa de craqueamento nos fornos.
- **Calor de Processo:** Presente na área de utilidades para geração de vapor que é utilizado na reação, purificação e acionamento de motores turbinado.
- **Refrigeração:** Presente no ciclo de refrigeração para fracionamento dos produtos, etapa de purificação.
- **Iluminação:** Presente em todas as etapas, através das lâmpadas usadas para iluminação local.

Fontes de energia

A energia térmica é o maior consumo energético utilizado nesse subsegmento, representando aproximadamente 94% do consumo total, enquanto o consumo de energia elétrica representa apenas 6%.

Nesse processo, na etapa de craqueamento das moléculas ocorre uma grande produção de gases de combustão a alta temperatura, que são utilizados para a geração de vapor que será consumido nas demais etapas do processo e no acionamento de compressores, bombas e ventiladores.

Outro reaproveitamento térmico comumente utilizado é o consumo dos próprios gases de processo gerados como co-produtos e também o consumo das frações mais pesadas condensadas no resfriamento. Esses combustíveis compõem aproximadamente 69% dos energéticos térmicos consumidos. Sendo o gás natural utilizado como combustível complementar nos fornos e nas caldeiras de vapor. Além desses energéticos anteriormente mencionados a indústria petroquímica diferente dos outros subsegmentos analisados no setor químico, também faz uso de carvão vapor na composição da sua matriz energética.

A energia elétrica é utilizada majoritariamente no acionamento de motores elétricos e iluminação.

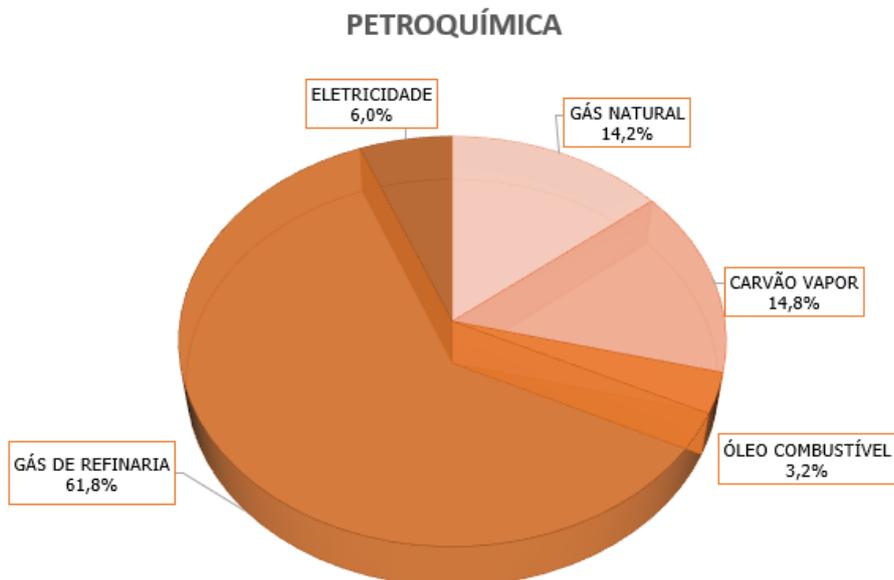


Gráfico 21 - Consumo energético do subsegmento petroquímico

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados de campo.

Principais equipamentos consumidores de energia

De acordo com os dados coletados, o consumo de energia total das plantas visitadas apresenta a média de 30.922,7,9 tep/ano para energia elétrica e 537.771,8 tep/ano para energia térmica.

Neste segmento existem muitos acionamentos a vapor, devido à grande quantidade de energia reaproveitada do processo de reforma catalítica, fazendo com que a quantidade de cargas elétricas seja reduzida.

Nesse cenário pode-se indicar como os maiores equipamentos consumidores de energia elétrica:

- Bomba de água de refrigeração;
- Bomba de água de alimentação de caldeiras;
- Ventiladores de ar das caldeiras;
- Compressores de fluidos refrigerantes na etapa de compressão;
- Bombas de calor.

Nota-se que as cargas elétricas são na maioria na área de utilidades, justificado pela necessidade de se manter a unidade de geração de eletricidade própria operando quando há um problema operacional na unidade de reforma catalítica, uma vez que essa etapa fornece maior parte do volume de vapor utilizado nos acionamentos.

E os principais equipamentos que consomem energia térmica:

- Bombas e compressores turbinados, em todas as etapas de produção, mas principalmente nas etapas de compressão e resfriamento;
- Refervedores das colunas de destilação na etapa de separação.

Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de petroquímicos apresenta consumo específico médio de energia elétrica em 0,00680 tep/t (79,0285 kWh/t de nafta, variando de 47,3529 a 119,6165 kWh/ t de nafta) e 0,10586 tep/ t de nafta (4,4322 GJ/ t de nafta, variando de 1,5083 a 6,8917 GJ/ t de nafta) em energia térmica, estimados por média ponderada pela produção de cada planta.

Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, a Tabela 20 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	80,0%	70,0%	65,0%	-	-	-
Carvão vapor	-	79,9%	-	64,9%	-	-	-
Óleo combustível		86,0%	-	64,9%	-	-	-
Gás de refinaria	-	79,9%	63,8%	64,9%	-	-	-
Eletricidade	89,2%	-	-	-	60,0%	-	-

Tabela 20 - Rendimento energético atual, subsegmento petroquímico

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Coeficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, a Tabela 21 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	53,0%	33,7%	13,2%	-	-	-
Carvão vapor	-	80,0%	-	20,0%	-	-	-
Óleo combustível		80,0%	-	20,0%	-	-	-
Gás de refinaria	-	53,1%	33,7%	13,3%	-	-	-
Eletricidade	97,0%	-	-	-	3,0%	-	-

Tabela 21 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento petroquímico

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Cogeração:

Em plantas onde há cogeração de eletricidade a partir de gases de processo existe a necessidade de estimar o consumo final deste tipo de combustível para o processo de produção em si, descontando-se a contribuição para a geração de eletricidade.

Desta forma para estimar o consumo de combustíveis para consumo final do processo de fabricação, adotou-se o padrão estabelecido pela nota técnica Coben 08/93.

Sendo assim, foi adotado o rendimento médio de 50% para a geração de eletricidade a partir da planta de cogeração, estimando-se a quantidade de combustível destinado exclusivamente à cogeração de eletricidade (COBEN, 1993). Dessa forma, foi possível estimar a quantidade de combustível utilizado no processo de fabricação (uso final), através da Equação 4 apresentada anteriormente.

É importante ressaltar que estes cálculos afetam diretamente os coeficientes de destinação apontados acima.

Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos aproximações e estimativas com o intuito de obter valores indicativos para o custo de reposição de equipamentos selecionados:

Motores elétricos:

Como estimativa de custo para reposição de motores foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a, 2018).

Como a ferramenta disponibilizada pela WEG é limitada a motores até 400 kW, para estimativa de custo de motores acima de 400 kW foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5, apresentada anteriormente.

A seguir encontra-se a premissa usada para estimativa de custo;

Idade do motor: Adotou-se o ano de partida da planta como ano base e assumiu-se que após 30 anos os motores foram substituídos. O período resultante foi então imputado na ferramenta online da WEG que determinou automaticamente o número estimado de rebobinagens, bem como o custo atual do motor.

Troca de lâmpadas por LED:

Adotou-se o critério de *payback* simples para estimativa do investimento necessário para substituição por LED. Desta forma com base na economia estimada calculou-se o investimento para atender o *payback* típico de 4 anos. O custo para repor tecnologia atual (um mix entre incandescente e fluorescente compacta) adotou-se metade do custo da tecnologia LED.

5.b.2. Situação com tecnologias mais eficientes

Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas de processo produtivo, no cenário alternativo, continuarão sendo as mesmas.

Entretanto, no sistema de eletricidade, uma oportunidade típica encontrada na maioria das plantas é a melhoria nos sistemas de força motriz e iluminação. Enquanto

no sistema térmico, as medidas de eficiência energética pertencem ao sistema de geração e distribuição de vapor. As medidas propostas podem ser observadas na Tabela 22.

MEDIDAS DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
Térmicas	Manutenção dos purgadores
	Retorno do condensado
	Melhoria no isolamento térmico
	Instalação pré aquecedor de ar nas caldeiras
	Controle avançado de processos em colunas de destilação
	Controle anti-surto dinâmico nos Compressores
	Instalação chiller na sucção de ar da turbina de gás
Elétricas	Troca/Manutenção de motor
	Troca de lâmpadas por LEDs

Tabela 22 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de petroquímicos

Fonte: Elaboração própria

Onde cada medida é caracterizada por:

Manutenção dos purgadores

Sistemas de vapor que não recebem manutenção por três a cinco anos, entre 15% e 30% dos purgadores instalados pode ter falha permitindo o escape de vapor vivo (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2015).

Um purgador apresentando vazamento pode ser comparado a um furo de 3 mm de diâmetro na tubulação e que pode descarregar 30 kg/h de vapor se estiver a uma pressão de 7,0 barg (SILVA A. C., 2013).

Retorno do condensado

Quando o vapor é utilizado indiretamente em um equipamento, ele transfere calor ao processo e se condensa. Esse condensado pode ser reaproveitado, economizando no tratamento da água anterior ao ser entregue a caldeira e energia. Esta ação apresenta um tempo de retorno do investimento econômico estimado em 15 meses e uma melhoria da eficiência de até 3% (LBNL, 2009).

Melhoria no isolamento térmico

Manter o isolamento térmico das caldeiras, tubulações e equipamentos consumidores em condições ideais do ponto de vista de sua funcionalidade é uma ação de eficiência energética também típica de sistemas de vapor. As perdas térmicas de uma caldeira bem conservada devem ser inferiores a 1% (LBNL, 2009).

Instalação de pré-aquecedor de ar nas caldeiras

Foi estimado que a instalação de um pré-aquecedor de ar pode incrementar a eficiência da caldeira em até 5% (EUROPEAN COMMISSION, 2009).

Controle avançado de processos em colunas de destilação

Uma perda típica em colunas de destilação, se dá no reciclo de topo da coluna. Esta corrente que retorna à coluna encontra-se fria pois é retornada após o condensador de topo. O reciclo é comumente utilizado para controle da qualidade do produto saindo do topo da coluna.

Tipicamente, a qualidade do produto é medida de forma amostral, e para garantir que não haja problemas de especificação, um alto nível de reciclo é utilizado, resultando em produtos de qualidade maior do que a especificação.

Esta medida de eficiência ocorre através da alteração do modo de controle de qualidade, com medidores online e a elaboração de algoritmo de controle avançado de processos que minimize o fluxo de retorno sem comprometer a qualidade.

Até 12% de economia pode ser obtida com esta medida (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2012). Estimou-se então que 10% do consumo de energia requerido nos refeedores possa ser economizada com um melhor controle de razão de refluxo através do controle avançado, diminuindo a variabilidade do processo.

Controle anti-surto dinâmico nos compressores

O fluxo total do compressor é uma soma do fluxo que ele envia para o processo e o fluxo de reciclagem (ou sopro) através da válvula anti-surto. A maneira mais eficiente de diminuir o uso de energia do compressor, é o controle anti-surto dinâmico e preciso, desde a medição até o algoritmo de controle até a válvula anti-surto. Saber onde você está em relação região de surto e quão rápido você pode responder define a margem de segurança necessária. Uma resposta rápida permite uma operação segura mais próxima da linha de surto. Essa abordagem protege o compressor contra surtos com uma abertura mínima possível da válvula anti-surto, consideravelmente economizando energia (EMERSON ELECTRIC Co, 2016).

Esta medida de eficiência energética implica em se alterar o sistema de controle anti surto através de um algoritmo avançado que controla a(s) válvula(s) de reciclo de maneira dinâmica, com base no ponto de operação do compressor a qualquer momento.

Assim, com a quantidade de reciclo otimizada, o consumo de vapor na turbina acionadora é também minimizado, além de aumento da vida útil dos equipamentos.

Instalação chiller na sucção de ar da turbina a gás

Devido à considerável variação de temperatura ao longo do ano ocasionando em variação na densidade do ar, conseqüentemente na vazão mássica de ar para a turbina a gás, portanto, à medida que a temperatura aumenta no verão, a vazão mássica de ar para a turbina a gás diminui. Esta variação pode ser compensada através da instalação de um chiller que refrigera o ar na sucção da turbina a gás aumentando a vazão mássica, resultando em um aumento da geração de eletricidade.

Troca / Manutenção de motor

A alteração dos motores mais antigos por outros de alto rendimento é uma medida para melhoria da eficiência da planta, porém não alterando o fato de que ainda continuarão como maiores consumidores elétricos.

Outro ponto importante relacionado a motores é o uso de *soft-starters*, tecnologia muito difundida, que aumenta o desempenho e vida útil das máquinas, também reduzindo o consumo de energia, principalmente em situações constantes de parada/partida.

Troca de lâmpadas por tecnologia LED

“O uso de tecnologia LED pode reduzir em 50% o consumo de energia” (Büll, 2015). Portanto, é aconselhável, onde possível, a total alteração do sistema de iluminação das unidades por lâmpadas de tecnologia LED. A estimativa de economia com a migração do sistema de iluminação para 100% LED foi feita considerando uma redução de 30% no consumo de eletricidade destinada a iluminação das plantas, visto que a maior parte do segmento já apresenta uma fração da iluminação com essa tecnologia.

Fontes de energia

No cenário alternativo, continuarão sendo usados os mesmos energéticos. Energia elétrica para iluminação e força motriz, e gás natural e gás de processo para queima nos fornos, e carvão vapor e óleo combustível para geração de vapor e cogeração.

Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores continuarão sendo os mesmos, porém com as medidas de eficiência aplicadas.

Indicadores energéticos

Em função da implementação das medidas de eficiência energética descritas acima, o consumo específico médio mais eficiente para o subsegmento petroquímico é de aproximadamente 0,09248 tep/t de nafta.

Nesse cenário mais eficiente, a energia elétrica tem um consumo específico médio de aproximadamente 0,00572 tep/t de nafta (66,57 kWh/t de nafta). E a energia térmica um consumo específico médio de aproximadamente 0,08676 tep/t de nafta.

Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a Tabela 23 apresenta as melhores referências identificadas no segmento de petroquímicos:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	93,0%	95,0%	80,0%	-	-	-
Carvão vapor	-	90,3%	-	80,0%	-	-	-
Óleo combustível		89,6%	-	80,0%			
Gás de refinaria	-	85,7%	95,0%	80,0%	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	-	85,0%	-	-

Tabela 23 - Rendimento energético alternativo, subsegmento petroquímico

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; conhecimento do consultor; (WEG b, 2018; HTL Brasil, 2018; TECHNIP, 2018; ENERGY.GOV, 2012; CONOCOPHILLIPS, 2007)

Coeficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a Tabela 24 apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	84,4%	-	15,6%	-	-	-
Carvão vapor	-	100,0%	-	-	-	-	-
Óleo combustível		100,0%	-	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	84,7%	-	15,3%	-	-	-
Eletricidade	100,0%	-	-	-	-	-	-

Tabela 24 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento petroquímico

Fonte: Elaboração própria com base nas medidas de eficiência energéticas aplicadas sobre os dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficientes

A Tabela 25 apresenta medidas de eficiência energética identificadas para o setor petroquímico. Para cada medida são apresentados os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e a economia por tonelada produzida.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO ATUAL¹ (R\$/ton produzida)	INVESTIMENTO MAIS EFICIENTE¹ (R\$/ton produzida)	ECONOMIA DE ENERGIA² (%)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/Ton Produzida)
Manutenção dos purgadores	-	0,07	2,03%	0,00028
Retorno de condensado	-	0,01	6,86%	0,00083
Melhoria no isolamento térmico	-	0,02	1,06%	0,00014
Instalação de pré aquecedor de ar nas caldeiras	-	0,31	5,00%	0,00003
Controle avançado de processo em colunas de destilação	-	0,62	11,44%	0,00184
Controle anti-surto dinâmico nos Compressores	-	0,06	2,53%	0,00033
Instalação chiller na sucção	-	0,20	2,15%	0,00013
Troca/Manutenção de motor	0,23	0,28	1,30%	0,00010
Troca de lâmpadas por LEDs	0,09	0,18	30,00%	0,00006

¹ Para equipamentos em valores dólar americano fora considerado a taxa do dólar do dia 17/06/2018 R\$3,70 (<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>).

² Economia de energia / consumo final de energético do respectivo serviço e fonte energética.

Tabela 25 - Investimento na situação melhorada - Petroquímica

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; (WEG a, 2018; EURO CHLOR, 2010; IEA, 2005; PERRY, 1997)

Onde cada medida é caracterizada por:

Manutenção de purgadores

A estimativa de investimento associada com a melhoria na manutenção de purgadores foi feita assumindo-se um custo de 100R\$/ purgador. O número de purgadores foi estimado em cerca de 5.000 unidades para uma planta petroquímica integrada de grande porte. E em 1.000 unidades para uma planta petroquímica de médio porte.

Retorno de condensado

A estimativa de investimento associada com o aumento do nível de retorno de condensado foi feita assumindo-se um custo de 0,1% sobre o custo das caldeiras, que por sua vez foi estimado em 220.000,00 R\$/tonelada (BERTINOTTI, 2016).

Melhoria no isolamento térmico

A estimativa de investimento associada com a melhoria do isolamento térmico foi feita assumindo-se um custo de 0,2% sobre o custo das caldeiras, que por sua vez foi estimado em 220.000,00 R\$/tonelada (BERTINOTTI, 2016).

Instalação de pré-aquecedor de ar nas caldeiras

O investimento necessário para a implementação de um pré-aquecedor de ar foi estimado com base no custo de uma caldeira nova de alta eficiência. Atribuiu-se um percentual de 5% do custo total como representativo do equipamento em questão. O custo da caldeira nova, com base na capacidade de produção de vapor, foi estimado em 220.000,00 R\$/tonelada (BERTINOTTI, 2016).

Controle avançado de processos em colunas de destilação

Para a instalação de um controle avançado de processos em colunas de destilação, estimou-se o investimento em termos de homens-hora necessários para estudo e implementação de algoritmo de controle avançado. Estimou-se que em média é necessário cerca de 200 homens-hora ao custo de 500 R\$/HH para cada coluna.

Controle anti-surto dinâmico nos compressores.

O custo do sistema de controle de compressores está diretamente relacionado a quantidade de funções de controle e número de estágios do compressor. Tipicamente, em projetos de implementação de controle anti-surto dinâmico, são instalados uma função de controle para cada estágio, que atua nas válvulas de reciclo e uma função de controle para principal variável do processo e uma função de controle para velocidade da turbina a vapor que aciona o compressor. Cada função de controle tem um custo estimado de 50 mil dólares (contato direto com empresa CCC – Compressor Controls Corporation).

Foi assumido para estimativa de custos desta medida, que a instalação de controle dinâmico anti-surto requer investimento de cerca de 50 mil dólares por estágio de compressão.

Instalação chiller na sucção

O custo de instalação de um chiller na sucção da turbina a gás é estimado em 300 dólares por tonelada de refrigeração para chillers com capacidade acima de 400 toneladas de refrigeração (ENERSION, 2017).

Troca / Manutenção de motor

Assim como foi feito para estimativa do custo de reposição de motores com tecnologias atuais, também foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, para motores de alta eficiência, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a,

2018). E para estimativa de custo de motores acima de 400 kW também foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5, apresentada anteriormente.

Nessa estimativa foi utilizada as mesmas premissas mencionadas para situação atual, que permite determinar o número estimado de rebobinagens, o custo do motor de alta eficiência e ganho de eficiência em percentual de redução no consumo de eletricidade.

O percentual de economia varia de acordo com a potência do motor e sua aplicação. Na Tabela 18 é mostrado um exemplo para um motor de 400 kW.

Troca de lâmpadas por LEDs

Esta estimativa foi realizada com base no *payback* simples típico de 4 anos para migração do sistema de iluminação (ARQUILED, 2018).

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, na Tabela 26 pode ser observado o potencial de economia do processo de produção do subsegmento petroquímico.

FONTE DE ENERGIA (tep/t)	FORÇA MOTRIZ	CALOR DE PROCESSO	AQUECIMENTO DIRETO	REFRIGERAÇÃO	ILUMINAÇÃO	TOTAL (%)
Gás natural	-	0,00179	0,00294	0,00195	-	19,43%
Carvão vapor	-	0,00171	-	0,00227	-	14,86%
Óleo combustível	-	0,00012	-	0,00044	-	10,42%
Gases de refinaria	-	0,00421	0,01619	0,00948	-	18,53%
Eletricidade	0,00040	-	-	-	0,00120	15,77%
Total	6,59%	8,48%	31,61%	18,88%	29,42%	17,95%

Tabela 26 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento petroquímico
Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

5.c. Subsegmento Fertilizantes

5.c.1. Situação atual

Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

O setor de fertilizantes é um subsegmento de química com um número grande de produtos relacionados. A análise da situação atual se concentrou nas plantas de fertilizantes nitrogenados, derivado no gás natural.

Nos processos de produção de amônia e ureia há pouca variação em relação ao seu processo produtivo. A síntese de amônia segue basicamente o processo desenvolvido

por Haber–Bosch com poucas variações. A produção de ureia é geralmente acoplada à produção de amônia, com sinergias importantes no fluxo de energia aproveitada. A produção de sulfato de amônio apresenta um processo bastante simples, podendo ser resumido por uma etapa de mistura dos reagentes seguida pela cristalização e purificação.

Na Figura 27 é apresentado o diagrama de blocos típico do cenário atual da indústria de fertilizantes nitrogenados.

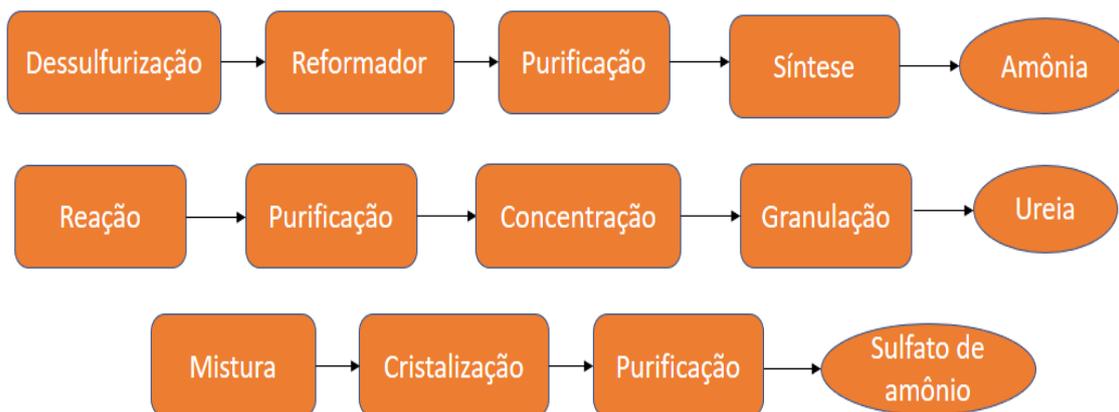


Figura 27 - Principais etapas de produção de fertilizantes básicos no cenário atual

Fonte: Elaboração própria

Segue abaixo as finalidades energéticas presentes nas etapas do processo de produção.

- **Força Motriz:** Presente em todas as etapas, através de motores para funcionamento de máquinas.
- **Aquecimento Direto:** Presente nos fornos, na etapa de reforma.
- **Calor de Processo:** Presente na área de utilidades para geração de vapor que é utilizado no acionamento de motores turbinados e para aquecimento em quase todas as etapas de produção.
- **Refrigeração:** Presente no ciclo de refrigeração de estocagem da amônia líquida.
- **Iluminação:** Presente em todas as etapas, através das lâmpadas usadas para iluminação local.

Fontes de energia

A energia elétrica é o maior consumo energético utilizado nesse subsegmento, representando 62,9% do consumo total, enquanto o consumo de energia térmica representa 37,1%, onde 2,1% dessa energia é proveniente do próprio processo.

Os energéticos térmicos são distribuídos para queima e geração de vapor, portanto serão consumidos majoritariamente nos fornos e caldeiras. Enquanto a energia

elétrica é utilizada majoritariamente no acionamento de motores elétricos e iluminação, e uma fração no ciclo de refrigeração da amônia.

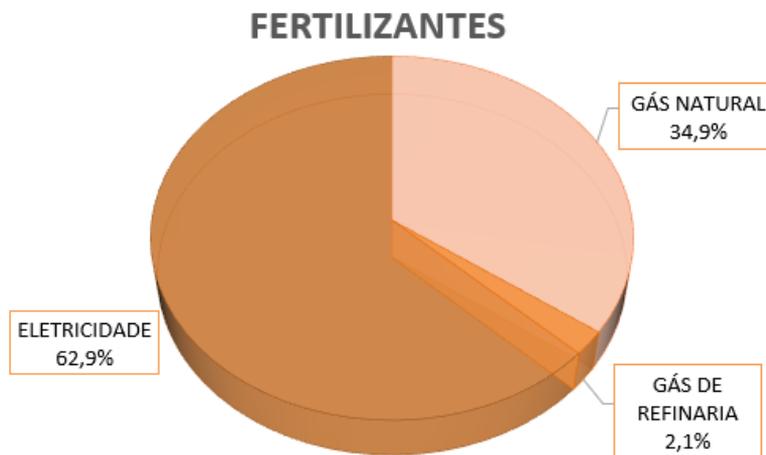


Gráfico 22 - Consumo energético do subsegmento fertilizantes

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados de campo.

Principais equipamentos consumidores de energia

De acordo com os dados coletados, o consumo de energia total das plantas visitadas apresenta a média de 105.991,5 tep/ano para energia elétrica e 126.342,3 tep/ano para energia térmica.

Nesse cenário pode-se indicar como os maiores equipamentos consumidores de energia elétrica:

- Bomba de água de refrigeração;
- Bomba de amônia;
- Compressor de CO₂.

E os principais equipamentos que consomem energia térmica:

- Bombas e compressores turbinados, em todas as etapas de produção, mas principalmente na produção de amônia;
- Para aquecimento e purificação em praticamente todas as etapas da produção de ureia.

Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de fertilizantes apresenta consumo específico médio de energia elétrica em 0,00066 tep/m³ de gás natural consumido (7,732 kWh/ m³ de gás natural consumido, variando de 0,254 a 44,956 kWh/ m³ de gás natural consumido) e 0,00039 tep/ m³ de gás natural consumido (0,016 GJ/m³ de gás natural consumido, variando de 0,0 a 0,027

GJ/ m³ de gás natural consumido) em energia térmica, estimados por média ponderada pela produção de cada planta.

Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, a Tabela 27 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	82,6%	74,2%	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	-	90,0%	-	-	-	-
Eletricidade	83,5%	-	-	75,0%	47,6%	-	-

Tabela 27 - Rendimento energético atual, subsegmento fertilizantes

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Coefficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, a Tabela 28 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE RENDIMENTO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	83,4%	16,6%	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	-	100,0%	-	-	-	-
Eletricidade	89,9%	-	-	7,7%	2,3%	-	-

Tabela 28 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento fertilizantes

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos aproximações e estimativas com o intuito de obter valores indicativos para o custo de reposição de equipamentos selecionados:

Motores elétricos:

Como estimativa de custo para reposição de motores foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a, 2018).

Como a ferramenta disponibilizada pela WEG é limitada a motores até 400 kW, para estimativa de custo de motores acima de 400 kW foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5, apresentada anteriormente.

A seguir encontra-se a premissa usada para estimativa de custo;

Idade do motor: Adotou-se o ano de partida da planta como ano base e assumiu-se que após 30 anos os motores foram substituídos. O período resultante foi então imputado na ferramenta online da WEG que determinou automaticamente o número estimado de rebobinagens, bem como o custo atual do motor.

Troca de lâmpadas por LED:

Adotou-se o critério de *payback* simples para estimativa do investimento necessário para substituição por LED. Desta forma com base na economia estimada calculou-se o investimento para atender o *payback* típico de 4 anos. O custo para repor tecnologia atual (um mix entre incandescente e fluorescente compacta) adotou-se metade do custo da tecnologia LED.

5.c.2. Situação com tecnologias mais eficientes

Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas do processo produtivo, no cenário alternativo, continuarão sendo as mesmas.

Entretanto, no sistema de eletricidade, uma oportunidade típica encontrada na maioria das plantas é a melhoria nos sistemas de força motriz e iluminação. Enquanto no sistema térmico, as medidas de eficiência energética pertencem ao sistema de geração e distribuição de vapor. As medidas propostas podem ser observadas na Tabela 29.

MEDIDAS DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
Térmicas	Instalação de pré-aquecedor de ar de combustão do reformador
	Migração para tecnologia purifier
	Instalação de turbina a vapor
Elétricas	Troca/Manutenção de motor
	Troca de lâmpadas por LEDs
	Recuperação de energia da redutora de pressão do ciclo carbonato de potássio
	Migração para tecnologia Purifier

Tabela 29 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de fertilizantes

Fonte: Elaboração própria

Onde cada medida é caracterizada por:

Instalação de pré-aquecedor de ar de combustão do reformador

De acordo com informações coletadas nas visitas a temperatura de saída dos gases do forno reformador é de proximadamente de 275 °C. Então, foi estimado que existe possibilidade de redução desta temperatura através de um pré-aquecimento do ar de combustão até a temperatura de 180 °C, sendo este o limite inferior para se evitar corrosão ácida.

Troca / Manutenção de motor

A alteração dos motores mais antigos por outros de alto rendimento é uma medida para melhoria da eficiência da planta, porém não alterando o fato de que ainda continuarão como maiores consumidores elétricos.

Outro ponto importante relacionado a motores é o uso de *soft-starters*, tecnologia muito difundida, que aumenta o desempenho e vida útil das máquinas, também reduzindo o consumo de energia, principalmente em situações constantes de parada/partida.

Troca de lâmpadas por tecnologia LED

“O uso de tecnologia LED pode reduzir em 50% o consumo de energia” (Büll, 2015). Portanto, é aconselhável, onde possível, a total alteração do sistema de iluminação das unidades por lâmpadas de tecnologia LED. A estimativa de economia com a migração do sistema de iluminação para 100% LED foi feita considerando uma redução de 30% no consumo de eletricidade destinada a iluminação das plantas, visto que a maior parte do segmento já apresenta uma fração da iluminação com essa tecnologia.

Migração para tecnologia purifier

A tecnologia purifier da empresa americana KBR apresenta inúmeras vantagens sobre a tecnologia atualmente em uso no Brasil para produção de amônia. Neste processo a tecnologia de purificação criogênica *front-end* remove simultaneamente as impurezas, como o metano e o argônio do gás de síntese, lavando-o com excesso de nitrogênio, ajustando o hidrogênio ao nitrogênio e deixando um gás de síntese quase inerte. Com isto a quantidade de ar é reduzida, e conseqüentemente a energia dispensada para a compressão do ar. O processo purifier da KBR é uma solução para fornecer a instalação de produção de amônia mais otimizada com custos de capital reduzidos, maior eficiência energética, flexibilidade de operação e confiabilidade. Já existem 28 plantas com esta tecnologia no mundo (KBR, 2018).

Estimou-se que esta tecnologia reduz o consumo energético da planta (gás natural e eletricidade) em até 30% com base na comparação entre o índice energético da planta e o índice energético estimado com a nova tecnologia.

Instalação de turbina a vapor

Em virtude da diferença na temperatura e pressão do vapor necessário para aquecimento durante o processo de produção de ureia e a temperatura e pressão do vapor gerado no reformador de gás natural dentro do processo de amônia, que é reaproveitado através de integração energética, a redução na pressão do vapor é feita com válvulas redutoras, gerando uma oportunidade de recuperação de potência através da instalação de uma turbina a vapor de contra pressão.

A eletricidade gerada é isenta de custos com combustível, e o processo de produção não precisa ser interrompido no caso de parada da turbina, pois a válvula redutora entra em operação automaticamente.

Recuperação de energia da redutora de pressão do ciclo carbonato de potássio

O sistema de recuperação de energia, substitui a válvula de expansão, recuperando energia do sistema de alta pressão para pressurizar a corrente de carbonato de potássio regenerada de volta ao absorvedor a alta pressão. Este sistema reduz eletricidade necessária na bomba de pressurização em até 70% (MARTIN, RICHTER, & SHIRAZI, 2016). A economia média associada com este sistema foi estimada em 0,925 kW / m³/h de vazão de carbonato de potássio (ENERGY RECOVERY, 2018)

Fontes de energia

No cenário alternativo, continuarão sendo usados os mesmos energéticos. Energia elétrica para iluminação e força motriz, e gás natural e gás de processo para queima nos fornos e caldeiras.

Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores continuarão sendo os mesmos, porém com as medidas de eficiência aplicadas.

Indicadores energéticos

Em função da implementação das medidas de eficiência energética descritas acima, o consumo específico médio mais eficiente para o subsegmento fertilizantes é de aproximadamente 0,00094 tep/m³ de gás natural consumido.

Nesse cenário mais eficiente, a energia elétrica tem um consumo específico médio de aproximadamente 0,00054 tep/ m³ de gás natural consumido (6,311 kWh/ m³ de gás natural consumido). E a energia térmica um consumo específico médio de aproximadamente 0,0004 tep/ m³ de gás natural consumido.

Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a Tabela 30 apresenta as melhores referências identificadas no segmento de fertilizantes:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	93,0%	95,0%	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	-	95,0%	-	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	82,0%	85,0%	-	-

Tabela 30 - Rendimento energético alternativo, subsegmento fertilizantes

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; conhecimento do consultor; (WEG b, 2018; HTL Brasil, 2018)

Coefficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a Tabela 31 apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE RENDIMENTO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	73,6%	26,4%	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	-	100,0%	-	-	-	-
Eletricidade	98,8%	-	-	0,5%	0,7%	-	-

Tabela 31 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento fertilizantes

Fonte: Elaboração própria com base nas medidas de eficiência energéticas aplicadas sobre os dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

A Tabela 32 apresenta medidas de eficiência energética identificadas para o setor de fertilizantes. Para cada medida são apresentados os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por volume de matéria-prima (gás natural).

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO ATUAL¹ (R\$/m³ de gás natural consumido)	INVESTIMENTO MAIS EFICIENTE¹ (R\$/ m³ de gás natural consumido)	ECONOMIA DE ENERGIA² (%)	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ m³ de gás natural consumido)
Recuperação de energia da redutora de pressão do ciclo carbonato de potássio	-	0,0028	13,02%	2,89x10 ⁻⁶
Troca/Manutenção de motor	0,0106	0,0130	9,16%	4,96 x10 ⁻⁶
Instalação de turbina a vapor	-	0,0092	2,59%	1,37x10 ⁻⁶
Migração para tecnologia purifier	5,1915	4,8231	30,00%	5,25x10 ⁻⁵
Instalação de pré-aquecedor de ar de combustão do reformador	-	0,0107	29,36%	1,99x10 ⁻⁵
Troca de lâmpadas por LEDs	0,0014	0,0027	30,00%	2,86x10 ⁻⁷

¹ Para equipamentos em valores dólar americano fora considerado a taxa do dólar do dia 17/06/2018 R\$3,70 (<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpeq.asp?id=txcotacao>).

² Economia de energia / consumo final de energético do respectivo serviço e fonte energética.

Tabela 32 - Investimento na situação melhorada - fertilizantes

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; ; (WEG a, 2018; IEA, 2005; PERRY, 1997)

Onde cada medida é caracterizada por:

Recuperação de energia da redutora de pressão do ciclo carbonato de potássio

A estimativa de investimento desta medida foi feita com base no custo unitário de 200 dólares/kWh (ENERGY RECOVERY, 2018).

Troca / Manutenção de motor

Assim como foi feito para estimativa do custo de reposição de motores com tecnologias atuais, também foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, para motores de alta eficiência, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a, 2018). E para estimativa de custo de motores acima de 400 kW foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5, apresentada anteriormente.

Nessa estimativa foi utilizada as mesmas premissas mencionadas para situação atual, que permite determinar o número estimado de rebobinagens, o custo do motor de alta eficiência e ganho de eficiência em percentual de redução no consumo de eletricidade.

O percentual de economia varia de acordo com a potência do motor e sua aplicação. Na Tabela 18 é mostrado um exemplo para um motor de 400 kW.

Instalação de turbina a vapor

O investimento necessário para instalação de turbina a vapor foi estimado em 1.136 dólares / kW (custo do equipamento instalado) conforme literatura para turbinas em aplicações de cogeração de eletricidade (U.S. DEPARTMENT ENERGY, 2016).

Migração para tecnologia purifier

O investimento atribuído à alteração da tecnologia atual para tecnologia purifier foi estimado com base na estimativa de custo de uma planta nova, em dólares por tonelada, informado nas visitas e convertido à capacidade atual das plantas visitadas.

Instalação de pré-aquecedor de ar de combustão do reformador

O investimento necessário para a implementação de um pré-aquecedor de ar foi estimado com base no custo de uma caldeira nova de alta eficiência. Atribuiu-se um percentual de 10% do custo total como representativo do equipamento em questão. O custo da caldeira nova, com base na capacidade de produção de vapor, foi estimado em 220.000,00 R\$/tonelada (BERTINOTTI, 2016).

Troca de lâmpadas por LEDs

Esta estimativa foi feita com base no *payback* simples típico de 4 anos para migração do sistema de iluminação (ARQUILED, 2018)

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, na Tabela 33 pode ser observado o potencial de economia do processo de produção do subsegmento de fertilizantes.

FORÇA	FORÇA	CALOR DE	AQUECIMENTO	REFRIGERAÇÃO	ILUMINAÇÃO	TOTAL
ENERGIA	MOTRIZ	PROCESSO	DIRETO			(%)
(tep/t)						
Gás natural	-	4,07x10 ⁻⁵	7,19x10 ⁻⁵	-	-	16,26%
Gás de refinaria	-	-	4,13x10 ⁻⁶	-	-	5,26%
Eletricidade	6,99x10 ⁻⁵	-	-	4,26x10 ⁻⁵	1,391x10 ⁻⁴	18,38%
Total	12,60%	11,17%	18,71%	8,54%	44,05%	17,21%

Tabela 33 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento de fertilizantes

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

5.d. Subsegmento Alcoolquímico

5.d.1. Situação atual

Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

O setor de alcoolquímica também é um subsegmento de química com pouca variação em relação ao seu processo produtivo, apresentando um processo relativamente simples.

Esse processo de produção compreende basicamente pela reação entre os reagentes, sendo um deles obrigatoriamente algum tipo de álcool, para produção de um derivado desse composto, que pode variar entre óxidos, éteres, ácidos, acetatos, entre outros produtos que fazem parte da cadeia alcoolquímica, seguido pelas etapas de retificação e purificação. Apesar da retificação ser representada separadamente esta pode ser considerada uma etapa de purificação, entretanto, nessa etapa o principal objetivo é recuperar os reagentes não consumidos, diferente da purificação, onde se obtém os produtos e coprodutos gerados na reação.

Na Figura 28 é apresentado o diagrama de blocos típico do cenário atual da indústria alcoolquímica.



Figura 28 - Principais etapas de produção de alcoolquímica no cenário atual

Fonte: Elaboração própria

Segue abaixo as finalidades energéticas presentes nas etapas do processo de produção.

- **Força Motriz:** Presente em todas as etapas, através de motores para funcionamento de máquinas.
- **Calor de Processo:** Presente na área de utilidades para geração de vapor que é utilizado nos refeedores das colunas de destilação presente nas etapas de retificação e purificação.
- **Iluminação:** Presente em todas as etapas, através das lâmpadas usadas para iluminação local.

Fontes de energia

O consumo de energia térmica e elétrico é bastante equilibrado, sendo 50,7% para o primeiro e 49,3% para o segundo.

O consumo de energia térmica é destinado à queima em caldeiras para geração de vapor. Por outro lado, o consumo de eletricidade é utilizado no acionamento de motores elétricos e iluminação.

ALCOOLQUÍMICA

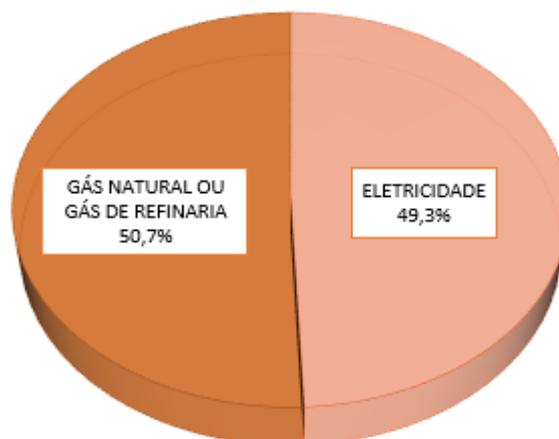


Gráfico 23 - Consumo energético do subsegmento de álcoolquímica

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados de campo.

Principais equipamentos consumidores de energia

De acordo com os dados coletados, o consumo de energia total das plantas visitadas apresenta a média de 4.521,6 tep/ano para energia elétrica e 7.000,9 tep/ano para energia térmica.

Nesse cenário pode-se indicar como os maiores equipamentos consumidores de energia elétrica:

- Motores elétricos.

E os principais equipamentos que consomem energia térmica:

- Refervedores das colunas de destilação;
- Injetores.

Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de álcoolquímica apresenta consumo específico médio de energia elétrica em 0,04043 tep/t (470,15 kWh/t) e 0,04162 tep/t (1,74265 GJ/t) em energia térmica, estimados por média ponderada pela produção de cada planta.

Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, a Tabela 34 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	90,0%	-	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	85,0%	-	-	-	-	-
Eletricidade	86,4%	-	-	-	65,7%	-	-

Tabela 34 - Rendimento energético atual, subsegmento alcoolquímica

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Coefficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, a Tabela 35 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	100,0%	-	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	100,0%	-	-	-	-	-
Eletricidade	97,3%	-	-	-	2,7%	-	-

Tabela 35 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento alcoolquímica

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos aproximações e estimativas com o intuito de obter valores indicativos para o custo de reposição de equipamentos selecionados.

Motores elétricos:

Como estimativa de custo para reposição de motores foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a,

2018). E para estimativa de custo de motores acima de 400 kW foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5, apresentada anteriormente.

A seguir encontra-se a premissa usada para estimativa de custo;

Idade do motor: Adotou-se o ano de partida da planta como ano base e em alguns casos assumiu-se que após 30 anos os motores foram substituídos, salvo informado ao contrário pelo representante da planta durante a visita. O período resultante foi então imputado na ferramenta online da WEG que determinou automaticamente o número estimado de rebobinagens, bem como o custo atual do motor.

5.d.2. Situação com tecnologias mais eficientes

Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas do processo produtivo, no cenário alternativo, continuarão sendo as mesmas.

Entretanto, no sistema de eletricidade, uma oportunidade típica encontrada na maioria das plantas é a melhoria nos sistemas de força motriz. Enquanto no sistema térmico, as medidas de eficiência energética pertencem ao sistema de geração e distribuição de vapor. As medidas propostas podem ser observadas na Tabela 36.

MEDIDAS DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
Térmicas	Manutenção dos purgadores
	Integração Energética através da Tecnologia Pinch
Elétricas	Troca/Manutenção de motor

Tabela 36 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de alcoolquímica

Fonte: Elaboração própria

Onde cada medida é caracterizada por:

Manutenção de purgadores

Sistemas de vapor que não recebem manutenção por três a cinco anos, entre 15% e 30% dos purgadores instalados pode ter falha permitindo o escape de vapor vivo (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2015).

Um purgador apresentando vazamento pode ser comparado a um furo de 3 mm de diâmetro na tubulação e que pode descarregar 30 kg/h de vapor se estiver a uma pressão de 7,0 barg (SILVA A. C., 2013).

Integração energética através da Tecnologia Pinch

A tecnologia PINCH, quando aplicada em processos industriais existentes é caracterizada pela reavaliação da malha de troca térmica através do (re)posicionamento e (re)dimensionamento de trocadores de calor de maneira a minimizar a necessidade do uso de utilidades na forma de calor (mais comumente uso de vapor) e refrigeração (ou água de resfriamento).

Este objetivo é atingido através da maximização do uso e troca de energia entre as correntes de processo, como por exemplo a corrente quente de saída de fundo das colunas de destilação que pré-aquece a corrente fria que entra na coluna, no lugar do uso de vapor adicional no refeedor por conta do resfriamento da coluna com a entrada do produto frio e uso adicional de água de resfriamento para esfriar os produtos quentes que saem do fundo da coluna.

A aplicação da tecnologia PINCH e integração de processo pode trazer economias dentro da faixa de 10 a 30% (NATURAL RESOURCES CANADA, 2016).

Estimou-se para os cálculos neste estudo que a economia de vapor trazida com a remodelação da malha de troca térmica é da ordem de 15%.

Troca / Manutenção de motor

A alteração dos motores mais antigos por outros de alto rendimento é uma medida para melhoria da eficiência da planta, porém não alterando o fato de que ainda continuarão como maiores consumidores elétricos.

Outro ponto importante relacionado a motores é o uso de *soft-starters*, tecnologia muito difundida, que aumenta o desempenho e vida útil das máquinas, também reduzindo o consumo de energia, principalmente em situações constantes de parada/partida.

Fontes de energia

No cenário alternativo, continuarão sendo usados os mesmos energéticos. Energia elétrica para iluminação e força motriz, e gás natural para queima em caldeiras para geração de vapor.

Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores continuarão sendo os mesmos, porém com as medidas de eficiência aplicadas.

Indicadores energéticos

Em função da implementação das medidas de eficiência energética descritas acima, o consumo específico médio mais eficiente para o subsegmento alcoolquímica é de aproximadamente 0,07496 tep/t produzida.

Nesse cenário mais eficiente, a energia elétrica tem um consumo específico médio de aproximadamente 0,03429 tep/t (398,76 kWh/t). A energia térmica um consumo específico médio de aproximadamente 0,04067 tep/t.

Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a Tabela 37 apresenta as melhores referências identificadas no segmento de alcoolquímica:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	93,0%	-	-	-	-	-
Gás de refinaria	-	85,7%	-	-	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	-	85,0%	-	-

Tabela 37 - Rendimento energético alternativo, subsegmento alcoolquímica

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; conhecimento do consultor; (WEG b, 2018; HTL Brasil, 2018)

Coeficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a Tabela 38 apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	100,0%	-	-	-	-	-
Gás de processo	-	100,0%	-	-	-	-	-
Eletricidade	97,5%	-	-	-	2,5%	-	-

Tabela 38 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento alcoolquímica

Fonte: Elaboração própria com base nas medidas de eficiência energéticas aplicadas sobre os dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

A Tabela 39 apresenta medidas de eficiência energética identificadas para o setor de álcoolquímica. Para cada medida são apresentados os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por tonelada produzida.

<i>EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA</i>	<i>INVESTIMENTO ATUAL¹</i> <i>(R\$/ton produzida)</i>	<i>INVESTIMENTO MAIS EFICIENTE¹</i> <i>(R\$/ton produzida)</i>	<i>ECONOMIA DE ENERGIA²</i> <i>(%)</i>	<i>ECONOMIA DE ENERGIA</i> <i>(tep/Ton Produzida)</i>
Manutenção de purgadores	-	2,07	2,00%	0,00108
Integração energética através da Tecnologia Pinch	-	27,66	15,00%	0,00811
Troca/Manutenção de motor	0,57	0,71	1,45%	0,00023

¹ Para equipamentos em valores dólar americano fora considerado a taxa do dólar do dia 17/06/2018 R\$3,70 (<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpsq.asp?id=txcotacao>).

² Economia de energia / consumo final de energético do respectivo serviço e fonte energética.

Tabela 39 - Investimento na situação melhorada - álcoolquímica

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; (WEG a, 2018)

Onde cada medida é caracterizada por:

Troca / Manutenção de motor

Assim como foi feito para estimativa do custo de reposição de motores com tecnologias atuais, também foi utilizado uma amostragem com base na ferramenta de estimativa de custo e eficiência energética da WEG, para motores de alta eficiência, sem custo de transporte e instalação, pois esse difere de região para região (WEG a, 2018). E para estimativa de custo de motores acima de 400 kW foi realizado um escalonamento de acordo com a Equação 5, apresentada anteriormente.

Nessa estimativa foi utilizada as mesmas premissas mencionadas para situação atual, que permite determinar o número estimado de rebobinagens, o custo do motor de alta eficiência e ganho de eficiência em percentual de redução no consumo de eletricidade.

O percentual de economia varia de acordo com a potência do motor e sua aplicação. Na Tabela 18 é mostrado um exemplo para um motor de 400 kW.

Manutenção de Purgadores

A estimativa de investimento associada com a melhoria na manutenção de purgadores foi feita assumindo-se um custo de 100R\$/ purgador. O número de purgadores foi estimado em cerca de 1.000 unidades para uma planta química de médio porte.

Integração Energética através da Tecnologia Pinch

Um projeto de otimização da malha de troca térmica é composto por horas de engenharia/consultoria e eventualmente custo de capital em trocadores de calor novos e/ou relocação de trocadores de calor existentes. Assumiu-se, portanto, para o cálculo do investimento que um projeto de otimização da malha de troca térmica entregue um *payback* simples de 2 anos.

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, na Tabela 40 pode ser observado o potencial de economia do processo de produção do subsegmento alcoolquímica.

FONTES DE ENERGIA (tep/t)	FORÇA MOTRIZ	CALOR DE PROCESSO	ILUMINAÇÃO	TOTAL (%)
Gás natural	-	0,00157	-	3,23%
Gás de refinaria		0,00025	-	0,82%
Eletricidade	0,00332	-	0,00602	15,19%
Total	9,49%	2,29%	22,67%	7,90%

Tabela 40 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento alcoolquímica

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

5.e. Subsegmento Gás-Químico

5.e.1. Situação atual

Produção etapas de processo e equipamentos utilizados

O setor gás-químico é um subsegmento de química que possui variações em relação ao seu processo produtivo, visto a diferença dos produtos obtidos. Todavia, podemos verificar que independente do produto gerado as plantas de produção apresentam a mesma ordem de processo; reação para obter o produto, seguido da purificação do mesmo. Portanto, a diferença dos processos é atribuída as operações unitárias existentes e quantidade de equipamentos instalados.

A produção de produtos derivados do gás natural no Brasil se dá unicamente pela tecnologia de reforma catalítica, através de fornos reformadores a vapor. Na Figura 29 é apresentado o diagrama de blocos típico do cenário atual da indústria gás-química.



Figura 29 - Principais etapas de produção de gás-químicos no cenário atual

Fonte: Elaboração própria

Segue abaixo as finalidades energéticas presentes nas etapas do processo de produção.

- **Força Motriz:** Presente em ambas etapas, através de motores para funcionamento de máquinas.
- **Aquecimento Direto:** Presente na etapa de reação nos fornos.
- **Calor de Processo:** Presente na área de utilidades para geração de vapor que é utilizado nas etapas de reação e purificação e também no acionamento de motores turbinado.
- **Refrigeração:** Presente no ciclo de refrigeração para fracionamento dos produtos, etapa de purificação.
- **Iluminação:** Presente em todas as etapas, através das lâmpadas usadas para iluminação local.

Fontes de energia

A energia térmica é o maior consumo energético utilizado nesse subsegmento, representando 95% do consumo total, enquanto o consumo de energia elétrica representa apenas 5%.

Esse processo de produção *Steam Methane Reformer* (SMR), utiliza gás combustível para elevação da temperatura da matéria-prima em aproximadamente 800 °C para obter o produto na presença do catalisador. Com isso, é uma forte característica desse segmento utilizar os gases de combustão a alta temperatura para geração de vapor que será consumido nos demais processos e no acionamento de compressores, bombas e ventiladores.

Outro reaproveitamento térmico comumente utilizado é o consumo dos próprios gases de processo gerados como subprodutos e também o consumo das frações mais pesadas condensadas no resfriamento. Esses combustíveis compõem 79% dos energéticos térmicos consumidos. Sendo o gás natural utilizado como combustível complementar nos fornos e nas caldeiras de vapor.

A energia elétrica é utilizada majoritariamente no acionamento de motores elétricos e iluminação.

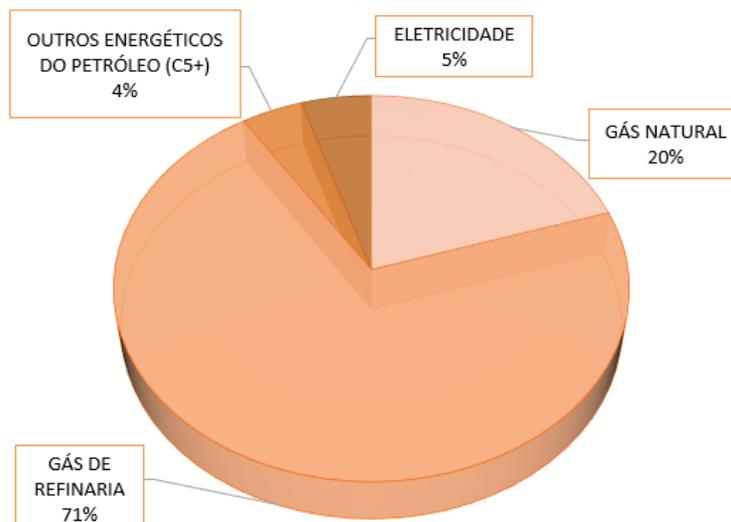


Gráfico 24 - Consumo energético do subsegmento gás-químico

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados de campo.

Principais equipamentos consumidores de energia

De acordo com os dados coletados, o consumo de energia total das plantas visitadas apresenta a média de 1.642,4 tep/ano para energia elétrica e 45.294,6 tep/ano para energia térmica.

Neste segmento existem muitos acionamentos a vapor, devido à grande quantidade de energia reaproveitada da etapa de reação, fazendo com que a quantidade de cargas elétricas seja reduzida.

Nesse cenário pode-se indicar como os maiores equipamentos consumidores de energia elétrica:

- Bombas de água de refrigeração;
- Bombas de água de alimentação de caldeiras;
- Ventiladores de ar das caldeiras;
- Compressores de fluidos refrigerantes na etapa de compressão.

Nota-se que as cargas elétricas são concentradas na área de utilidades.

E os principais equipamentos que consomem energia térmica:

- Fornos de reforma;
- Bombas e compressores turbinados, em todas as etapas de produção, mas principalmente nas etapas de compressão e resfriamento;
- Refervedores das colunas de destilação na etapa de purificação.

Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria gás-química apresenta consumo específico médio de energia elétrica em 0,00003 tep/m³ de gás natural consumido (0,3639 kWh/ m³ de gás natural consumido, variando de 0,03857 a 3,60254 kWh/m³ de gás natural consumido) e 0,00062 tep/t (0,02589 GJ/ m³ de gás natural consumido, variando de 0,00367 a 0,24703 GJ/ m³ de gás natural consumido) em energia térmica, estimados por média ponderada pela produção de cada planta.

Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, a Tabela 41 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	85,8%	93,0%	65,0%	-	-	-
Gases de refinaria	-	85,0%	92,5%	65,0%	-	-	-
Eletricidade	94,7%	-	-	-	55,0%	-	-
Outras fontes secundárias de petróleo	-	80%	-	65,0%	-	-	-

Tabela 41 - Rendimento energético atual, subsegmento gás-químico

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Coeficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, a Tabela 42 apresenta os valores obtidos:

FONTES DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	56,6%	33,4%	10,0%	-	-	-
Gases de processo	-	40,1%	49,9%	10,0%	-	-	-
Eletricidade	96,2%	-	-	-	3,8%	-	-
Outras fontes secundárias de petróleo	-	80,0%	-	20,0%	-	-	-

Tabela 42 - Coeficiente de destinação atual, subsegmento gás-químico

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos aproximações e estimativas com o intuito de obter valores indicativos para o custo de reposição de equipamentos selecionados:

Troca de lâmpadas por LED

Adotou-se o critério de *payback* simples para estimativa do investimento necessário para substituição por LED. Desta forma com base na economia estimada calculou-se o investimento para atender o *payback* típico de 4 anos. O custo para repor tecnologia atual (um mix entre incandescente e fluorescente compacta) adotou-se metade do custo da tecnologia LED.

5.e.2. Situação com tecnologias mais eficientes

Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas de processo produtivo, no cenário alternativo, continuarão sendo as mesmas.

As principais medidas de conservação de eletricidade na maioria das plantas da indústria gás-química encontram-se na melhoria dos sistemas de força motriz, iluminação e integração energética da turbina a gás com o forno.

Outras medidas podem ser observadas na Tabela 43.

MEDIDAS DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	
Térmicas	Manutenção dos purgadores
	Retorno do condensado
	Melhoria no isolamento térmico.
Elétricas	Sistema de cogeração de eletricidade
	Troca de lâmpadas por LED
	Recuperação de energia do gás produzido

Tabela 43 - Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento gás-químico

Fonte: Elaboração própria

Onde cada medida é caracterizada por:

Manutenção dos purgadores

Sistemas de vapor que não recebem manutenção por três a cinco anos, entre 15% e 30% dos purgadores instalados pode ter falha permitindo o escape de vapor vivo (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2015).

Um purgador apresentando vazamento pode ser comparado a um furo de 3 mm de diâmetro na tubulação e que pode descarregar 30 kg/h de vapor se estiver a uma pressão de 7,0 barg (SILVA A. C., 2013).

Retorno do condensado

Quando o vapor é utilizado indiretamente em um equipamento, ele transfere calor ao processo e se condensa. Esse condensado pode ser reaproveitado, economizando no tratamento da água anterior ao ser entregue a caldeira e energia. Esta ação apresenta um tempo de retorno do investimento econômico estimado em 15 meses e uma melhoria da eficiência de até 3% (LBNL, 2009).

Melhoria no isolamento térmico

Manter o isolamento térmico das caldeiras, tubulações e equipamentos consumidores em condições ideais do ponto de vista de sua funcionalidade é uma ação de eficiência energética também típica de sistemas de vapor. As perdas térmicas de uma caldeira bem conservada devem ser inferiores a 1% (LBNL, 2009).

Sistema de cogeração

Turbinas a gás podem ser acopladas a reformadores a vapor. Neste sistema, os gases quentes exauridos da turbina a gás contendo cerca de 13% de oxigênio e temperaturas de cerca de 540 °C são utilizados como ar de combustão no forno, reduzindo consumo de combustível na fornalha e ao mesmo tempo gerando eletricidade adicional (WORRELL, CORSTEN, & GALITSKY, 2015).

Em plantas onde o consumo de eletricidade da rede de distribuição é reduzido, devido à alta geração de eletricidade pela planta de cogeração, ou pelo alto grau de turbinamento a vapor dos acionamentos de eixo (bombas, ventiladores e compressores), uma atenção especial deve ser dispensada em casos onde a turbina a gás acoplada ao forno tem uma capacidade de geração de eletricidade maior do que o consumo médio de eletricidade. Nestas situações, a planta passa a ser uma central geradora de eletricidade e suas implicações devem ser consideradas.

Existem também opções onde uma turbina a gás alimenta dois ou mais fornos. Isto pode reduzir o custo com a turbina uma vez que turbinas maiores possuem um custo por quilowatt menor, entretanto, demandam maiores cuidados com o projeto de integração, exigindo instalações intermediárias que direcionam os gases quentes exauridos pela turbina para atmosfera em situações onde um ou mais fornos integrados estejam fora de operação.

Troca de lâmpadas por LED

“O uso de tecnologia LED pode reduzir em 50% o consumo de energia” (Büll, 2015). Portanto, é aconselhável, onde possível, a total alteração do sistema de iluminação das unidades por lâmpadas de tecnologia LED. A estimativa de economia com a migração do sistema de iluminação para 100% LED foi feita considerando uma redução de 30% no consumo de eletricidade destinada a iluminação das plantas, visto que a maior parte do segmento já apresenta uma fração da iluminação com essa tecnologia.

Recuperador de energia do gás produzido

O sistema de recuperação de energia, substitui a válvula de expansão, recuperando energia do sistema de alta pressão para pressurizar a corrente de carbonato de potássio regenerada de volta ao absorvedor a alta pressão. Este sistema reduz a eletricidade necessária na bomba de pressurização em até 70% (MARTIN, RICHTER, & SHIRAZI, 2016). A economia média associada com este sistema foi estimada em 0,925 kW / m³/h de vazão de carbonato de potássio (ENERGY RECOVERY, 2018).

Fontes de energia

No cenário alternativo, continuarão sendo usados os mesmos energéticos. Energia elétrica para iluminação e força motriz, e gás natural, gás de processo e outros energéticos do petróleo para geração de vapor e combustível nos fornos.

Principais equipamentos consumidores de energia

Os principais equipamentos consumidores continuarão sendo os mesmos, porém com as medidas de eficiência aplicadas.

Indicadores energéticos

Em função da implementação das medidas de eficiência energética descritas acima, o consumo específico médio mais eficiente para o subsegmento gás-químico é de aproximadamente 0,00061 tep/m³ de gás natural consumido.

Nesse cenário mais eficiente, a energia elétrica tem um consumo específico médio de aproximadamente 0,00003 tep/ m³ de gás natural consumido (0,31466 kWh/ m³ de gás natural consumido). E a energia térmica um consumo específico médio de aproximadamente 0,00058 tep/ m³ de gás natural consumido.

Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a Tabela 44 apresenta as melhores referências identificadas no segmento gás-químico:

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	93,0%	95,0%	80,0%	-	-	-
Gases de processo	-	85,7%	95,0%	80,0%	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	-	85,0%	-	-
Outras fontes secundárias de petróleo	-	85,0%	-	80,0%	-	-	-

Tabela 44 - Rendimento energético alternativo, subsegmento gás-químico

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; conhecimento do consultor; (WEG b, 2018; HTL Brasil, 2018; TECHNIP, 2018; ENERGY.GOV, 2012; CONOCOPHILLIPS, 2007)

Coefficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas a Tabela 45 apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FONTES DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás natural	-	48,5%	41,3%	10,3%	-	-	-
Gases de processo	-	41,1%	50,5%	8,4%	-	-	-
Eletricidade	97,4%	-	-	-	2,6%	-	-
Outras fontes secundárias de petróleo	-	82,2%	-	17,8%	-	-	-

Tabela 45 - Coeficiente de destinação alternativo, subsegmento gás-químico

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente

A Tabela 46 apresenta medidas de eficiência energética identificadas para o setor gás-químico. Para cada medida são apresentados os custos para reposição do equipamento atual (quando aplicável), o custo do equipamento eficiente, o percentual de economia de energia e economia por volume de matéria-prima (gás natural) consumido.

EQUIPAMENTO E MEDIDAS DE MELHORIA	INVESTIMENTO ATUAL¹ (R\$/ m³ de gás natural consumido)	INVESTIMENTO MAIS EFICIENTE¹ (R\$/ m³ de gás natural consumido)	ECONOMIA DE ENERGIA(%)²	ECONOMIA DE ENERGIA (tep/ m³ de gás natural consumido)
Sistema de cogeração de eletricidade	-	1,55x10 ⁻¹	46,10%	1,23x10 ⁻⁵
Recuperação de energia do gás produzido	-	2,93x10 ⁻⁴	9,27%	2,98x10 ⁻⁷
Isolamento Térmico	-	7,81x10 ⁻³	1,00%	6,72x10 ⁻⁶
Retorno de condensado	-	2,93x10 ⁻⁴	9,27%	2,98x10 ⁻⁷
Manutenção dos purgadores	-	1,77x10 ⁻²	2,00%	1,34x10 ⁻⁵
Troca de lâmpadas por LEDs	0,02	4,29x10 ⁻²	30,00%	3,72x10 ⁻⁶

¹ Para equipamentos em valores dólar americano fora considerado a taxa do dólar do dia 17/06/2018 R\$3,70 (<http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>).

² Economia de energia / consumo final de energético do respectivo serviço e fonte energética.

Tabela 46 - Investimento na situação melhorada da indústria gás-química

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo; (WEG a, 2018; ENERGY RECOVERY, 2018; IEA, 2005; PERRY, 1997)

Onde cada medida é caracterizada por:

Sistema de cogeração de eletricidade

O investimento necessário desta medida foi feito com base no custo específico para instalar turbina a gás de 700 \$/kW de potência instalada (IEA, 2005). A estimativa da potência instalada foi feita utilizando-se a geração de eletricidade estimada com a nova turbina a gás.

Recuperação de energia do gás produzido

A estimativa de investimento desta medida foi feita com base no custo unitário de 200 dólares/kWh (ENERGY RECOVERY, 2018).

Isolamento Térmico

A estimativa de investimento associada com a melhoria do isolamento térmico foi feita assumindo-se um custo de 0,2% sobre o custo das caldeiras, que por sua vez foi estimado em 220.000,00 R\$/tonelada (BERTINOTTI, 2016).

Retorno de condensado

A estimativa de investimento associada com o aumento do nível de retorno de condensado foi feita assumindo-se um custo de 1% sobre o custo das caldeiras, que por sua vez foi estimado em 220.000,00 R\$/tonelada (BERTINOTTI, 2016).

Manutenção de purgadores

A estimativa de investimento associada com a melhoria na manutenção de purgadores foi feita assumindo-se um custo de 100R\$/ purgador. O número de purgadores foi estimado em cerca de 5.000 unidades para uma planta petroquímica integrada de grande porte.

Troca de lâmpadas por LEDs

Esta estimativa foi feita com base no *payback* simples típico de 4 anos para migração do sistema de iluminação (ARQUILED, 2018).

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas, a Tabela 47 pode ser observado o potencial de economia do processo de produção do subsegmento gás-químico.

FONTE DE ENERGIA (tep/t)	FORÇA MOTRIZ	CALOR DE PROCESSO	AQUECIMENTO DIRETO	REFRIGERAÇÃO	ILUMINAÇÃO	TOTAL (%)
Gás natural	-	8,61x10 ⁻⁶	2,55x10 ⁻⁶	1,59x10 ⁻⁵	-	8,52%
Gás de processo	-	2,91x10 ⁻⁵	1,02x10 ⁻⁴	5,12x10 ⁻⁴	-	6,31%
Outros energéticos do petróleo	-	-	-	-	-	0,0%
Eletricidade	2,58x10 ⁻⁷	-	-	-	6,08x10 ⁻⁶	13,53%
Total	0,87%	1,03%	2,61%	18,75%	35,34%	13,53%

Tabela 47 - Potencial de economia do processo de produção do subsegmento gás-químico

Fonte: Elaboração própria com base em dados obtidos na pesquisa de campo

6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETREÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO

Entende-se como condicionante algo que condiciona ou restringe a aplicação das medidas de eficiência energética propostas, sendo muito importante a sua avaliação antes de iniciar o plano de implementação destas medidas. Neste estudo serão avaliados os condicionantes técnicos, econômico-financeiros, e outros condicionantes adicionais para cada subsegmento.

As maiores empresas da indústria química são unidades que operam em regime bastante intenso, praticamente sem paradas prolongadas. Assim, a janela de oportunidade para alterações visando racionalização do uso da energia está na substituição de equipamentos. Nesse momento, em função da conjuntura econômica e energética, decide-se por uma tecnologia ou equipamento, que irá operar por anos a fio. Consequentemente, as ações voltadas ao uso racional da energia dependem de conjunturas específicas nas poucas oportunidades de realização desses investimentos (CNI, 2010).

A adoção de iluminação LED também é uma medida de eficiência energética, porém com potencial pouco representativo, já que a iluminação representa menos do que 5% no consumo de eletricidade no segmento. Quando avalia-se essa medida, deve-se adequar a instalação para a nova tecnologia, à medida que as lâmpadas de vapor de sódio/metálico e fluorescentes vão chegando ao final de sua vida útil. É importante notar que na prática o incentivo maior para adoção da tecnologia LED tem sido sua vida útil, resultando em menor esforço de mão de obra dedicadas à troca de lâmpadas dentro dos complexos, sendo esta mão de obra aproveitada em trabalhos com maior complexidade e, portanto, melhor empregadas.

Os maiores consumidores de energia elétrica, de modo geral na indústria química são as cargas motrizes. Com isso torna um grande motivador para a redução de consumo de energia elétrica, a troca dos motores atuais por outros de maior rendimento (em torno de 95,5%), e a utilização de controle e acionamentos eletrônicos, que adicionalmente podem aumentar o tempo de vida útil das máquinas.

Outro grande condicionante está nas pessoas que operam os equipamentos e tomam conta das plantas industriais. Deve-se visar pela formação e contratação de profissionais capacitados na questão de energia, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação, auxiliando no uso dessas tecnologias. Uma alternativa para as organizações obterem consciência de eficiência energética é o emprego da ABNT NBR ISO 50.001 – Sistemas de Gestão de Energia, que demonstra o mínimo necessário para ter um consumo energético eficiente.

A seguir serão discutidos os condicionantes específicos a cada subsegmento.

6.a. Subsegmento Soda-Cloro

Uma medida de grande impacto no aumento da eficiência energética do setor é a adoção da tecnologia de eletrólise a base de membranas. Esta tecnologia tem o potencial de redução no consumo global de energia de uma planta de soda-cloro em até 30% sobre o consumo de uma planta similar com células eletrolíticas a base da tecnologia de diafragma. A migração de tecnologia é altamente custosa e envolve mudanças em todas as áreas de produção o que resulta em pouco interesse por parte das lideranças das empresas.

Uma nova tecnologia a OCD (Oxygen-depolarized Cathode), onde oxigênio inserido no catodo inibe a formação de hidrogênio resultando em redução da voltagem da célula, é atualmente comercializada pela empresa Thyssen-Krupp e promete uma redução de até 25% no consumo de energia sobre uma planta similar com células eletrolíticas baseadas na tecnologia membrana. A conversão de uma planta com tecnologia de membrana para OCD não é complicada, uma vez que as células eletrolíticas e o ciclo da salmoura não são alterados. Entretanto, é uma tecnologia recente, com apenas uma planta em operação no China, apesar disso é um fator condicionante para adoção no Brasil (THYSSENKRUPP a, 2018).

6.b. Subsegmento Petroquímico e Gás-Químico

Um grande entrave para investimentos na indústria petroquímica é ocasionado pelo alto custo das matérias primas no Brasil, com a concorrência mais barata no exterior, como o gás de xisto nos EUA, aliadas com plantas de maior eficiência, tornam a rentabilidade das operações brasileiras comparativamente baixa (FAIRBANKS, 2017). Isto resulta em escassos recursos para investimentos, sendo que na sua maioria são destinados à manutenção e troca de equipamentos obsoletos restando pouco para aumento eficiência energética e até mesmo aumentos de capacidades.

Este subsegmento emprega uma quantidade substancial de vapor, com sistemas de distribuição grandes e complexos, na maioria abrangendo milhares de purgadores e pouca taxa de retorno de condensado. Este vapor é fornecido para terceiros que se instalam nas proximidades dos grandes reformadores utilizados para o processamento do eteno, propeno e compostos aromáticos gerados. Com isto observa-se um retorno de condensado baixo, cuja melhoria se torna difícil devido à complexidade do sistema de distribuição e pouco incentivo para esta prática.

Algumas tecnologias empregadas em outras partes do mundo, não são tão difundidas neste subsegmento no Brasil. Exemplos são a integração entre turbina a gás e reformadores, controle avançado de processos nas colunas de destilação e recuperação de energia do gás produzido. Os condicionantes para estas medidas se dão em uma combinação de desconhecimento, custos associados e a aparente complexidade envolvida no planejamento de sua implementação, o que leva propostas de melhorias a serem deixadas de lado sem maiores estudos.

6.c. Subsegmento Fertilizantes

Neste subsegmento, principalmente em plantas integradas de produção de amônia e urea existe uma sinergia energética importante entre estas unidades, onde a primeira gera grande quantidade de energia térmica, através do reaproveitamento de calor nos reformadores a vapor, e exporta para planta de ureia, uma vez que esta é grande consumidora de energia motriz para acionamento de compressores e energia térmica nas etapas de concentração e purificação do produto.

Observou-se que os sistemas de vapor que reaproveitam a energia mencionada são de baixa pressão e baixa temperatura e que entregam vapor direto ao processo, destruindo potencial de utilização avançada da energia. Sistemas mais eficientes produzem vapor a alta pressão e alta temperatura que passa por um gerador de eletricidade a vapor reduzindo sua pressão e temperatura para então ser utilizado como fonte térmica nos processos. Com isto reduz-se a dependência na rede de distribuição de eletricidade e diminui-se custos.

Um condicionante que se verificou para a melhoria indicada se dá pela ausência de atenção voltada para o aspecto de melhorias no sistema de geração e distribuição de vapor, levando a potenciais de geração elétrica desperdiçadas. O custo de investimento em melhorias é relativamente alto e aliado ao desconhecimento e necessidade de reavaliação do sistema de geração de vapor, o que acaba deixando uma importante medida de aumento de eficiência energética desconsiderada.

6.d. Subsegmento Alcoolquímico

O setor alcoolquímico teve um grande momento de avanço no Brasil na década de 70 com o Programa Proálcool através de subsídios e garantia de fornecimento do etanol para a indústria química, entretanto, neste momento de expansão teve uma vida curta. Em 1982 o governo equiparou o preço do etanol ao da nafta e em 1984 removeu subsídios à exportação de produtos químicos através da rota do etanol (CGEE, 2010).

Esta políticas elevaram custos e diminuíram rentabilidade da indústria, reduzindo recursos financeiros para financiamento próprio de projetos em eficiência energética.

Adicionalmente, com exceção da planta da Braskem que possui significância nacional, as demais plantas em operação que utilizam etanol como matéria-prima são relativamente pequenas e naturalmente dispõem de recursos limitados para melhorias em seus processos de produção.

Desta forma o custo e a disponibilidade do etanol são fatores condicionantes importantes para uma rentabilidade sadia das operações, levando a geração sustentável de recursos para investimentos em eficiência energética.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De modo geral, a indústria química demonstra uma preocupação com relação ao nível de eficiência energética nas operações. Seja através da participação em sistemas mundiais de benchmarking, como o Solomon Chemical, participando de iniciativas dentro da ABIQUIM (Comitê de Energia) ou usufruindo do Programa Aliança (CNI, 2018), uma parceria entre CNI e ABRACE, entre outras iniciativas.

Na maioria, as empresas possuem comitês ou grupos de trabalho que se reúnem periodicamente para discutir consumo energético e avançar ideias de incremento na eficiência energética.

Entretanto, os projetos de eficiência energética para a indústria muitas vezes concorrem com projetos de expansão da planta, de incremento de qualidade do produto e de segurança operativa. Também, devido ao atual cenário econômico, a indústria se encontra em uma situação econômica difícil, com capacidade de endividamento limitada. A combinação desses fatores apontam para uma conclusão já observada em vários outros países, a necessidade de estímulos para criar o mercado de eficiência energética (BRITO, 2018).

Nesse estudo foi possível analisar a indústria química, subdivididas nos segmentos de soda-cloro, petroquímica, fertilizantes, gás-química e álcoolquímica. No geral foi observado que dentro de cada subsegmento embora apresentassem algumas variações no processo produtivo de acordo com o produto de interesse, esses processos podem ser classificados com baixa variação, respeitando na sua maioria a mesma ordem das operações unitárias utilizadas.

Quanto ao consumo energético foi observado o uso majoritário dos energéticos térmicos, com exceção da indústria soda-cloro, onde o consumo elétrico supera o térmico, devido ao uso exclusivo da eletricidade na eletrólise, principal etapa do processo desse subsegmento.

É importante ressaltar que a indústria química não apresenta grande variação nos tipos de energéticos térmicos utilizados, prevalecendo o uso de gás natural e de gás de refinaria. E uma pequena fração de carvão vegetal e óleo combustível, muito menos significativo que os energéticos anteriormente citados.

Outro ponto importante é quanto ao uso de serviço, prevalecendo na indústria química a destinação dos energéticos para força motriz, calor de processo e iluminação, aparecendo em todos os subsegmentos. Os demais usos de serviço também compõe o atual segmento analisado, entretanto, varia entre os subsegmentos. Em relação ao coeficiente de destinação, o aquecimento direto e o calor de processo são fortes destinos nas indústrias petroquímica, gás-química e fertilizantes; a eletroquímica prevalece no processo da indústria soda-cloro no uso da eletricidade e a refrigeração aparece em todos os subsegmentos com exceção da álcoolquímica, porém a refrigeração não tem grande representatividade em comparação com os demais usos.

O potencial encontrado no estudo a partir do rendimento atual das plantas e o rendimento das melhores tecnologias disponíveis no mercado atual é de: 20,84% para o subsegmento de soda-cloro, 18,05% para o subsegmento de petroquímica, 17,08% para o subsegmento de fertilizantes, 4,16% para o subsegmento de alcoolquímica e 7,02% para o subsegmento de gás-química.

Os potenciais apresentados anteriormente foram obtidos através das medidas de eficiência energética propostas ao longo do estudo, apresentadas na Tabela 48.

FONTE	MEDIDAS DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	S-C	P	F	A	G-Q
Elétricas	Troca de células eletrolíticas para tecnologia membrana					
	Troca de motores para motores de alto rendimento					
	Troca da iluminação para tecnologia LED					
	Inversor de Frequência					
	Recuperação de energia no ciclo de carbonato de potássio					
	Migração para tecnologia Purifier					
	Sistema de cogeração de eletricidade					
Térmicas	Instalação de pré aquecedor de ar nas caldeiras ou reformador					
	Manutenção de purgadores					
	Retorno de condensado					
	Melhoria no isolamento térmico					
	Controle avançado de processo em colunas de destilação					
	Controle anti-surto dinâmico nos Compressores					
	Instalação chiller na sucção de ar da turbina de gás					
	Integração de turbina a vapor					
	Migração para tecnologia Purifier					
	Integração Energética através da Tecnologia Pinch					

Legenda: S-C = indústria soda-cloro; P = petroquímica; F = fertilizantes; A = alcoolquímica; G-Q = gás-química.

Tabela 48 - Medidas de melhoria na eficiência energética geral, segmento químico

Fonte: Elaboração Própria



- **Recomendações**

A implementação e estudo de viabilidade das tecnologias recentes com casos de sucesso no exterior, porém menos difundidas no Brasil, irá permitir ao setor reduzir significativamente seu consumo energético.

Publicações internacionais relacionando melhores práticas e guias / ideias de medidas de aumento de eficiência energética estão disponíveis de maneira online e gratuita, como por exemplo o Energy Star (ENERGY STAR, 2018) e os documentos de referência sobre as Melhores Técnicas Disponíveis (MTD) publicado pela comissão europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2018), com muitos documentos já traduzidos para o português (AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, 2018).

Estes programas apresentam uma fonte valiosa de informação acionável para auxiliar gerentes de energia e eficiência energética a montarem seus planos estratégicos no sentido de reduzir custos com energia e, diretamente, reduzir emissões de gases de efeito estufa.

E, embora estruturadas com comitês de energia e/ou eficiência energética, se faz necessário que as empresas invistam na capacitação destes profissionais proporcionando-lhes ferramentas e conhecimento necessário para que possam identificar corretamente ações de melhoria, supervisionar adequadamente a implementação de projetos para redução nos custos com energia e sobretudo garantir a perenidade das ações realizadas para aumento da eficiência energética, evitando sua degradação ao longo do tempo.

8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS

- ABICLOR. (2014). *Balanço sócio-econômico indústria de cloro-álcalis*. São Paulo. Acesso em 22 de 03 de 2018
- ABICLOR a. (2018). *Relatório Estatístico Janeiro/Dezembro de 2017*. São Paulo. Acesso em 22 de 04 de 2018, disponível em <http://www.abiclor.com.br/wp-content/uploads/2018/03/Abiclor-Relatorio-Estatistico-Janeiro-Dezembro-2017.pdf>
- ABICLOR b. (2018). *TECNOLOGIA DIAFRAGMA*. Acesso em 06 de 04 de 2018, disponível em Abiclor: <http://www.abiclor.com.br/diafragma/>
- ABICLOR c. (2018). *TECNOLOGIA MEMBRANA*. Acesso em 06 de 04 de 2018, disponível em Abiclor: <http://www.abiclor.com.br/membrana/>
- ABICLOR d. (2018). *TECNOLOGIA MERCÚRIO*. Acesso em 06 de 04 de 2018, disponível em Abiclor: <http://www.abiclor.com.br/mercurio/>
- ABIQUIM. (2017). *O Desempenho da Indústria Química em 2017*. Acesso em 13 de 04 de 2018, disponível em https://abiquim.org.br/uploads/guias_estudos/desempenho_industria_quimica_2017.pdf
- ABIQUIM a. (2018). Anuário da Indústria Química Brasileira. São Paulo. Acesso em 13 de 04 de 2018
- ABIQUIM b. (2018). *RAC – Crescimento econômico poderia ser muito maior se houvesse uma política industrial que permitisse agregar valor aos recursos naturais brasileiros*. INFORMATIVO SEMANAL, ABIQUIM. Acesso em 13 de 04 de 2018, disponível em ABIQUIM: https://abiquim.org.br/uploads/informa/edicao_631.pdf
- ABISOLO. (2017). *Anuário Brasileiro de Tecnologia Brasileira em Nutrição Vegetal*. São Paulo. Acesso em 05 de 05 de 2018, disponível em <https://abisolo.com.br/anuario-edicoes-anteriores/>
- ABISOLO. (2018). *4º Anuário Brasileiro de Tecnologia em Nutrição Vegetal*. Acesso em 15 de 04 de 2018, disponível em <https://abisolo.com.br/anuario/>
- AGÊNCIA PETROBRÁS. (2018). *Petrobras assina contrato para construção da Unidade de Processamento de Gás Natural em Itaboraí*. Acesso em 23 de 04 de 2018, disponível em Agência Petrobrás: http://www.agenciapetrobras.com.br/Materia/ExibirMateria?p_materia=980125
- AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. (2018). *Documentos de Referência sobre MTD (BREF)*. Acesso em 07 de 08 de 2018, disponível em Agência portuguesa do ambiente: <https://www.apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=151&sub2ref=321>
- ANDA. (2017). *Principais Indicadores do setor de fertilizantes*. Acesso em 15 de 04 de 2018, disponível em ANDA: http://www.anda.org.br/estatistica/Principais_Indicadores_2017.pdf
- ARQUILED. (2018). *Análise de payback*. Acesso em 11 de 06 de 2018, disponível em ARQUILED: <https://www.arquiled.com/servicos/analise-de-payback/>
- BAIÃO, R. R. (2015). *Ácido Acético: Tecnologias e Análise de Mercado*. Rio de Janeiro. Acesso em 26 de 04 de 2018, disponível em http://sicbolsas.anp.gov.br/sicbolsas/Uploads/TrabalhosFinais/2010.3926-0/20150413-MONOGRAFIA_0.pdf

- BARROS, K. M., & FARIA, S. D. (2015). *repositório uff institucional*. Acesso em 09 de 04 de 2018, disponível em repositório uff institucional:
http://www.repositorio.uff.br/jspui/bitstream/1/1644/1/TCC_Sabrina_e_Kauwa.pdf
- BERTINOTTI, C. R. (2016). *Guia de cogeração e geração de energia elétrica a gás natural*. GásBrasiliiano. Acesso em 10 de 07 de 2018, disponível em
<http://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/informacoes-tecnicas/arquivo/guia-de-cogerao-formatado.pdf>
- BRASKEM a. (2018). *O Setor Petroquímico*. Acesso em 24 de 04 de 2018, disponível em Braskem: <http://www.braskem-ri.com.br/o-setor-petroquimico>
- BRASKEM b. (2018). *I'm Green Braskem*. Acesso em 25 de 04 de 2018, disponível em BRASKEM: <http://plasticoverde.braskem.com.br/site.aspx/PE-Verde-Produtos-e-Inovacao>
- BRITO, N. (2018). *Como incentivar a eficiência energética em escala industrial*. Acesso em 07 de 08 de 2018, disponível em ABRACE:
<http://abrace.org.br/2018/01/26/como-incentivar-a-eficiencia-energetica-em-escala-industrial/>
- Büll, P. (2015). *Uso de LED pode reduzir em 50% o consumo de energia*. Acesso em 27 de 08 de 2018, disponível em brasil Economico:
<http://brasileconomico.ig.com.br/brasil/economia/2015-02-13/uso-de-led-pode-reduzir-em-50-o-consumo-de-energia.html>
- CGEE. (2010). Alcoolquímica. Em *Química verde no Brasil: 2010-2030* (pp. 117-138). Brasília. Acesso em 22 de 04 de 2018, disponível em
https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Livro_Quimica_Verde_9560.pdf/f6fa468d-8725-46d6-bc90-6c185835e4bf?version=1.3
- CGEE. (2017). *Prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro*. Brasília. Acesso em 25 de 04 de 2018, disponível em
<https://energia.cgee.org.br/documents/923365/1026936/Volume+5-8+Evoluc%CC%A7a%CC%83o+tecnolo%CC%81gica+nacional+no+segmento+de+distribuic%CC%A7a%CC%83o+de+energia+ele%CC%81trica.pdf/df3d8370-b2d0-44be-ae84-989dd32ba686?version=1.2>
- CHAZIN, E. L. (2012). Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos. *Revista Virtual de Química ISSN 1984-6835*, 4(6), 872-883.
doi:10.5935/1984-6835.20120061
- CHEMICAL ENGINEERING. (2015). *Ethylene production via cracking of ethane-propane*. Acesso em 11 de 04 de 2018, disponível em Chemical engineering:
<http://www.chemengonline.com/ethylene-production-via-cracking-ethane-propane/>
- CLIMATE-DATA.ORG. (2018). *Climate-data.org*. Acesso em 02 de 07 de 2018, disponível em Clima: Triunfo: <https://pt.climate-data.org/location/43813/>
- CNI. (2010). *Oportunidade de eficiência energética para indústria*. Brasília. Acesso em 22 de 03 de 2018, disponível em
<http://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2012/9/oportunidades-de-eficiencia-energetica-para-a-industria/#sumario-visao-institucional%20>
- CNI. (2018). *Programa Aliança*. Acesso em 07 de 08 de 2018, disponível em
file:///C:/Users/B5/Downloads/Programa%20Alian_a%20-%20Rodrigo%20Garcia%20-%20CNI.pdf

- COBEN. (1993). *Tratamento da cogeração nos balanços energéticos*. Acesso em 29 de 06 de 2018, disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1143893/1.11+-+Nota+T%C3%A9cnica+COBEN+08+-+Tratamento+da+Cogera%C3%A7%C3%A3o+%28PDF%29/486e1ef5-6b21-46fd-9c4a-46276e5eefd1;jsessionid=690C5ADFB94086EC1A8576F444108ED2.srv155>
- CONOCOPHILLIPS. (2007). *A fresh look at LNG process efficiency*. Acesso em 10 de 07 de 2018, disponível em CONOCOPHILLIPS: http://static.conocophillips.com/files/resources/smidth_016_weldonspaperIngindustry.pdf
- COPPLESTONE, J. C., & KIRK, C. M. (2018). *Ammonia and urea production*. Acesso em 12 de 04 de 2018, disponível em <https://nzic.org.nz/ChemProcesses/production/1A.pdf>
- CORTEZ, K. A. (2008). *Produção de hidrogênio a partir da oxidação parcial do metano empregando carbeto de molibdênio em óxido de cério como catalisador*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro. Acesso em 10 de 09 de 2018, disponível em <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2009-1/216-producao-de-hidrogenio-a-partir-da-oxidacao-parcial-do-metano-empregando-carbeto-de-molibdenio-em-oxido-de-cerio-como-catalisador/file>
- CRUZ, F. E. (2010). *Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: Avaliação exergética e custo de produção*. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo. Acesso em 07 de 09 de 2018, disponível em https://www.researchgate.net/publication/46100622_Producao_de_hidrogenio_em_refinarias_de_petroleo_avaliacao_exergetica_e_custo_de_producao
- DANFOSS. (2010). *Thermodynamic limitations and opportunities for reaching high energy-efficient refrigeration, heat pump and air conditioning systems*. Acesso em 05 de 07 de 2018, disponível em <http://files.danfoss.com/technicalinfo/dila/01/DKRCC.PE.000.D1.02.pdf>
- EMBRAPA. (2018). *EMBRAPA*. Acesso em 02 de 05 de 2018, disponível em Agência Embrapa de Informação tecnológicas: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn102wx5eo0sawqe333t7wt4.html>
- EMERSON ELECTRIC Co. (2016). *Compressor control: Maximizing safety and efficiency*. Acesso em 28 de 08 de 2018, disponível em emerson: <https://www.emerson.com/documents/automation/emerson-solution-for-optimal-turbomachinery-control-en-587900.pdf>
- EMERSON PROCESS MANAGEMENT. (2012). *Energy Efficient and Always On-Spec: Emerson's Integrated Distillation Solution*. Acesso em 02 de 07 de 2018, disponível em <http://www.emerson.com/documents/automation/energy-efficient-always-on-spec-emerson-s-integrated-distillation-solution-en-41816.pdf>
- EMERSON PROCESS MANAGEMENT. (2015). *Cinco Medidas Principais de Eficiência Energética*. Acesso em 11 de 07 de 2018, disponível em Emerson Process Management: <http://www.emerson.com/documents/automation/cinco-medidas-principais-de-eficiencia-energ-etica-pt-80138.pdf>

- ENERGY RECOVERY. (2018). *Webinar: IsoBoost for Ammonia Production*. Acesso em 10 de 07 de 2018, disponível em ENERGY RECOVERY: <http://www.energyrecovery.com/resource/weinbar-dr-prem-krish-on-isoboost-for-gas-processing>
- ENERGY STAR. (2018). *Energy guides*. Acesso em 07 de 08 de 2018, disponível em Energy Star: <https://www.energystar.gov/buildings/facility-owners-and-managers/industrial-plants/improve/energy-guides>
- ENERGY.GOV. (2012). *Benchmark the Fuel Cost of Steam Generation*. Acesso em 27 de 06 de 2018, disponível em ENERGY.GOV: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/steam15_benchmark.pdf
- ENERSION. (2017). *ENERSION*. Acesso em 03 de 07 de 2018, disponível em Cost of the current cooling technology: <http://enersion.com/cost-of-the-current-cooling-technology/>
- ENGINEERS GUIDE. (2018). *Ammonium Sulphate Production from Coke oven gas containing Ammonia when reacted with Sulphuric acid*. Acesso em 12 de 04 de 2018, disponível em ENGINEERS GUIDE: <http://enggyd.blogspot.com/2011/05/ammonium-sulphate-production-from-coke.html>
- EPE. (2017). *BEN - Balanço Energético Nacional*. Acesso em 19 de 03 de 2018, disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf
- ESTADÃO. (2018). *RELATÓRIO DA ADMINISTRAÇÃO BRASKEM 2017*. Acesso em 24 de 04 de 2018, disponível em <https://economia.estadao.com.br/fatos-relevantes/pdf/27507187.pdf>
- EURO CHLOR. (2010). *The European Chlor-Alkali industry: an electricity intensive sector exposed to carbon leakage*. Brussels. Acesso em 05 de 07 de 2018, disponível em http://www.eurochlor.org/media/9385/3-2-the_european_chlor-alkali_industry_-_an_electricity_intensive_sector_exposed_to_carbon_leakage.pdf
- EUROPEAN COMMISSION. (2009). *Energy Efficiency*. Acesso em 02 de 07 de 2018, disponível em http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf
- EUROPEAN COMMISSION. (2018). *Reference documents under the IPPC Directive and the IED*. Acesso em 07 de 08 de 2018, disponível em European Commission: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>
- FAIRBANKS, M. (2017). *Perspectivas 2017 - Indústria Química: Setor volta a crescer, pede reformas amplas para sair da estagnação*. Acesso em 02 de 08 de 2018, disponível em <https://www.quimica.com.br/perspectivas-2017-industria-quimica-setor-volta-crescer-mas-pede-reformas-amplas-para-sair-da-estagnacao/>
- GASNET. (2013). *Gás natural*. Acesso em 25 de 04 de 2018, disponível em GasNet - O site do gás natural: http://www.gasnet.com.br/gasnatural/materia_completa.asp
- GUPTA, A. (2015). *Manufacture of chlorine-caustic soda using electrolysis process*. Acesso em 06 de 04 de 2018, disponível em SlideShare: <https://www.slideshare.net/AnkushGupta40/phase23>
- HTL Brasil. (2018). *Tabela de equivalência entre lâmpadas LED e lâmpadas convencionais*. Acesso em 06 de 07 de 2018, disponível em HTL Brasil:

- <http://www.htlbrasil.com/Arquitetura/PDF/tabela-de-equivalencia-de-iluminacao-e-economia-de-energia-eletrica.pdf>
- IEA. (2005). *Tecnologia BIG-GT: energia a partir da gaseificação da biomassa da cana*. Acesso em 05 de 07 de 2018, disponível em Instituto de Economia Agrícola (IEA): <http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=3814>
- IEB. (2003). *The Chloralkali Industry*. Acesso em 06 de 04 de 2018, disponível em <https://archive.cnx.org/contents/aa7150af-f836-461c-81f1-d3dd128f2b37@1/the-chemical-industry-the-chloralkali-industry>
- Inflation Calculator. (09 de 06 de 2018). *U.S. Inflation Rate, \$100 in 1990 to 2018*. Fonte: Inflation Calculator: <https://www.officialdata.org/1990-dollars-in-2018>
- JEGATHISAN, D. (2014). *Chlor-Alkali Industry Production of caustic Soda & Chlorin*. Acesso em 06 de 04 de 2018, disponível em SlideShare: <https://www.slideshare.net/dharisineejegathisan/cpi-presentattion-caustic-soda-chlorine>
- JERMOLOVICIUS, L. A., MENTE, B. B., MARTINS, M. C., YAMAGUCHI, S. M., SANCHEZ, V. C., NASCIMENTO, R. B., . . . SENIZE, J. T. (2017). *Processo assistido por micr-ondas para desidratação de etanol a etileno*. Acesso em 02 de 05 de 2018, disponível em Quimica.com.br: <https://www.quimica.com.br/artigo-tecnico-processo-assistido-por-micro-ondas-para-desidratacao-de-etanol-etileno/>
- KASTHERBRASIL. (2018). *Indústria química e comércio*. Acesso em 08 de 08 de 2018, disponível em <http://www.katherbrasil.com.br/quimica.html>
- KBR. (2018). *KBR we deliver*. Acesso em 25 de 07 de 2018, disponível em Fertilizers: From ammonia to UAN, KBR offers efficient solutions for fertilizers production: <https://www.kbr.com/technologies/fertilizers#/tab7>
- KHURSHEED, A. F., MANSFIELD, C. A., DEPRO, B. M., & PERRY, V. A. (2000). *The Chlorine Industry: A Profile*. Acesso em 09 de 06 de 2018, disponível em <https://www3.epa.gov/ttnecas1/regdata/EIAs/chlorine%20profile.pdf>
- KIROS, Y., & BURSELL, M. (2008). Low Energy Consumption in Chlor-alkali Cells Using Oxygen Reduction Electrodes. *Int. J. Electrochem. Sci*, 3, 444 - 451. Acesso em 02 de 07 de 2018, disponível em <http://www.electrochemsci.org/papers/vol3/3040444.pdf>
- LBNL. (2009). *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*. Acesso em 11 de 07 de 2018, disponível em Institute for industrial productivity: <http://www.iipnetwork.org/world-best-practice-energy-intensity-values-selected-industrial-sectors>
- MACEDO, G. B. (2012). *Olefinas leves*. Acesso em 07 de 09 de 2018, disponível em https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/64373/Resumo_23595.pdf?sequence=1
- MARTIN, J., RICHTER, M., & SHIRAZI, M. (2016). *Application of a Hydraulic Turbogenerator in the Acid Gas Removal at a Gas Plant in the Middle East*. Acesso em 11 de 07 de 2018, disponível em <http://www.energyrecovery.com/wp-content/uploads/2016/04/SOGAT-2016-MS2-ERII.pdf>
- MEIRELLES, L. B. (2014). *Caracterização da nafta petroquímica para a produção de aromáticos*. Dissertação, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro. Acesso em 24 de 05 de 2018, disponível em <http://epqb.eq.ufrj.br/download/caracterizacao-da-nafta-petroquimica-para-producao-de-produtos-aromaticos.pdf>

- MME. (2011). *Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas*. Acesso em 26 de 04 de 2018, disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Efici%C3%A2ncia+Energ%C3%A9tica+%28PDF%29/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863>
- MME. (2018). *MME encaminha à Casa Civil recomendações do CNPE sobre conteúdo local e refino*. Acesso em 15 de 05 de 2018, disponível em Ministério de Minas e Energia: http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMkwwB/content/mme-encaminha-a-casa-civil-recomendacoes-do-cnpe-sobre-conteudo-local-e-refino
- MOREIRA, C., FERNANDES, E., GOMES, G. L., DVORSAK, P., HEIL, T. B., & BASTOS, V. D. (2007). *Potencial de Investimentos no Setor Petroquímico Brasileiro 2007-2010*. Acesso em 25 de 04 de 2018, disponível em BNDES: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14375/1/5%20Potencial%20de%20Investimentos%20no%20Setor%20Petroqu%C3%ADmico%20Brasileiro%202007-2010_P_BD.pdf
- NASCIMENTO, M., MONTE, M. B., & LOUREIRO, F. E. (2005). Potássio. Em A. B. LUZ, & F. A. LINS, *ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS: USOS E ESPECIFICAÇÕES* (pp. 173-199). Rio de Janeiro. Acesso em 30 de 04 de 2018
- NATURAL RESOURCES CANADA. (2016). *Process Integration and Pinch Analysis*. Acesso em 03 de 08 de 2018, disponível em NATURAL RESOURCES CANADA: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/efficiency/industry/processes/systems-optimization/process-integration/5497>
- NICACIO, A. S. (2014). *Craqueamento do Petróleo*. Conclusão de curso, Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Química, Campina Grande. Acesso em 09 de 05 de 2018, disponível em <http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/5200/1/PDF%20-%20Aldenira%20Silvestre%20Santana%20Nic%C3%A1cio.pdf>
- NIKOLAIDIS, P., & POUILLIKAS, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597 . doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- PERALTA, I. A. (2015). *Síntese e Otimização das*. Campinas. Acesso em 30 de 04 de 2018, disponível em https://www.researchgate.net/profile/Ivan_Peralta2/publication/278018713_KCL_production_using_Sylvinite_a_new_method_of_extraction/links/5578826a08aeacff20028515/KCL-production-using-Sylvinite-a-new-method-of-extraction.pdf
- PERRY, R. H. (1997). *Perry's chemical engineers' handbook* (Vol. 7th).
- PESCE, L. D., & JENKS, W. R. (1992). Synthetic Nitrogen Products. Em J. A. KENT, *Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology* (pp. 1068-1140). New York. Acesso em 11 de 04 de 2018, disponível em https://springer.proxy.ufrj.br/content/pdf/10.1007%2F978-1-4757-6431-4_28.pdf
- PORTARIA MME. (2018). *Portaria MME nº 9*. Acesso em 12 de 04 de 2018, disponível em MME: http://www.mme.gov.br/documents/10584/52444163/Portaria_n_9-2018/124b976e-da71-47d7-acd3-1f6b87825119;jsessionid=0C931A5415E9D253464829630C43FB48.srv155?version=1.0

- PwC. (2013). *Industria química do Brasil*. Acesso em 19 de 04 de 2018, disponível em <https://www.pwc.com.br/pt/publicacoes/setores-atividade/assets/quimico-petroquimico/2013/pwc-chemicals-port-13.pdf>
- QUÍMICA E DERIVADOS a. (2016). *História da Química - 50 anos do setor químico passou pelas páginas de Química e Derivados*. Acesso em 24 de 04 de 2018, disponível em Química.com.br: <https://www.quimica.com.br/quimica-e-derivados-50-anos-meio-seculo-da-historia-do-setor-quimico-passou-pelas-paginas-de-qd/4/>
- QUÍMICA E DERIVADOS b. (2016). *Oportunidades na cadeia dos aromáticos*. Acesso em 24 de 04 de 2018, disponível em Site do Química.com.br: <https://www.quimica.com.br/cenarios-da-petroquimica-brasileira-oportunidades-na-cadeia-dos-aromaticos-artigo-tecnico/2/>
- REVISTA PETRO & QUÍMICA. (2016). Sustentabilidade Desafios (e oportunidades) das mudanças climáticas. *Petro & Química*, 369, 43. Acesso em 25 de 04 de 2018, disponível em https://issuu.com/editora_valete/docs/pq369
- ROY, A. H. (2007). Fertilizers and Food Production. Em J. A. KENT (Ed.), *Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology* (pp. 1111-1156). Boston. doi:<https://doi.org/10.1007/978-0-387-27843-8>
- SARAIVA, R. (2018). *Petrobras dá prazo de 120 dias para a Fafen apresentar soluções*. Acesso em 24 de 08 de 2018, disponível em Correio*: <https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/petrobras-da-prazo-de-120-dias-para-a-fafen-apresentar-solucoes/>
- SARTORE, P. E. (2014). *OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE AMÔNIA (UFN V)*. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da EQ/UFRJ, RIO DE JANEIRO. Acesso em 12 de 04 de 2018, disponível em EPQB - Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos da EQ/UFRJ: <http://186.202.79.107/download/otimizacao-energetica-de-uma-planta-de-producao-de-amonia-ufn-v.pdf>
- Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries. (2013). *Ethyl Alcohol Oxidation Process Flow Diagram to Produce Acetaldehyde*. Acesso em 09 de 05 de 2018, disponível em Science, Engineering & Technology for Business, Research and Industries: <http://archive.is/PZuFx#selection-333.0-365.22>
- SILVA, A. C. (2013). *Conservação e gerenciamento de energia em sistema de vapor*. Conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão. Acesso em 11 de 07 de 2018, disponível em http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/972/1/CM_COEAL_2012_2_03.pdf
- SILVA, P. A., DUPIM, M. S., & CHAZIN, E. L. (2015). Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos: Ácido acético. *Revista Virtual de Química*, 7(6), 2647-2662. Acesso em 25 de 04 de 2018, disponível em Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos: <http://rvq.sbgq.org.br/imagebank/pdf/v7n6a49.pdf>
- SIMÕES, J. M. (2016). *Produção de butanol a partir de etanol utilizando óxido mistos de Mg e Al*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Rio Grande do sul. Acesso

- em 02 de 05 de 2018, disponível em
http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/12011/DIS_PPGEQ_2016_SIMOE_S_JANA.pdf?sequence=1
- TECHNIP. (2018). *Ethylene production*. Acesso em 29 de 06 de 2018, disponível em TECHNIP:
http://www.technip.com/sites/default/files/technip/fields/publications/attachments/ethylene_june_2015_web_0.pdf
- THYSSENKRUPP a. (2018). *Solutions provided by NaCl-ODC electrolysis technology*. Acesso em 04 de 07 de 2018, disponível em thyssenkrupp:
<https://www.thyssenkrupp-uhde-chlorine-engineers.com/en/products/chlor-alkali-electrolysis/odc-technology/benefits-of-the-odc-technology/>
- THYSSENKRUPP b. (2018). *Oxygen Depolarized Cathode (NaCl-ODC) Chlor-Alkali Electrolysis*. Acesso em 04 de 07 de 2018, disponível em thyssenkrupp:
<https://www.thyssenkrupp-uhde-chlorine-engineers.com/en/references/oxygen-depolarized-cathode-nacl-odc-chlor-alkali-electrolysis/>
- TRANE. (2018). *trane CenTraVac centrifugal water-cooled chillers*. Acesso em 07 de 07 de 2018, disponível em TRANE: <http://www.trane.com/commercial/north-america/us/en/products-systems/equipment/chillers/water-cooled-chiller/centrifugal-liquid-cooled-chillers.html>
- U.S. DEPARTMENT ENERGY. (2016). *U.S. DEPARTMENT ENERGY*. Acesso em 22 de 07 de 2018, disponível em Steam Turbines:
<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/CHP-Steam%20Turbine.pdf>
- VASCONCELOS, N. D. (2006). *Reforma a vapor de metano em catalisadores à base de níquel promovidos com nióbia*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Química, Niterói. Acesso em 10 de 09 de 2018, disponível em http://www.bdtd.ndc.uff.br/tde_arquivos/12/TDE-2008-02-29T134157Z-1343/Publico/nicevasconcellos.pdf
- VIANA, F. L. (2017). *INDÚSTRIA PETROQUÍMICA*. Banco do Nordeste. Acesso em 27 de 08 de 2018, disponível em
https://www.bnb.gov.br/documents/80223/2666752/17_petro_V2.pdf/c99a1b65-d39a-b572-c877-5a3aeb52838c
- WEG a. (2018). *WEG*. Acesso em 25 de 06 de 2018, disponível em WEG SEE+:
<https://www.weg.net/see+/pages/regua.jsp>
- WEG b. (2018). *Eficiência energética em motores elétricos*. Acesso em 05 de 07 de 2018, disponível em WEG:
http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp
- WORRELL, E., CORSTEN, M., & GALITSKY, C. (2015). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Petroleum Refineries*. ENERGY STAR. Acesso em 29 de 06 de 2018, disponível em
https://www.energystar.gov/sites/default/files/tools/ENERGY_STAR_Guide_Petroleum_Refineries_20150330.pdf