

LUCAS DUARTE LIMA

A IMPORTÂNCIA DO CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO NO
PROCESSO DE REFINO

Guaratinguetá
2024

LUCAS DUARTE LIMA

**A IMPORTÂNCIA DO CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO NO
PROCESSO DE REFINO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho de Júnior

Guaratinguetá
2024

L732i	Lima, Lucas Duarte A Importância do craqueamento catalítico fluidizado no processo de refino / Lucas Duarte Lima - Guaratinguetá, 2024. 45 f : il. Bibliografia: f. 44-45 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho de Júnior 1. Petróleo. 2. Craqueamento catalítico. 3. Petróleo - Refinarias. I. Título.
CDU 622.323	

LUCAS DUARTE LIMA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

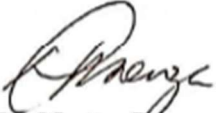
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. João Andrade de Carvalho de Júnior
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Thiago Averaldo Bimestre
UNESP-FEG


Prof. Dr. Nestor Proenza Pérez
UNESP FEG

Novembro 2024

DADOS CURRICULARES

LUCAS DUARTE LIMA

NASCIMENTO	10.05.1987 – JACAREÍ / SP
FILIAÇÃO	Jair Corrêa de Lima Maria da Conceição Duarte da Silva Lima
2002/2003	Mecânica Geral de Usinagem na escola SENAI Luiz Simon – Jacareí-SP
2011/2011	Curso Técnico em Eletrônica no Colégio Técnico Instituto Monitor Ltda. – São Paulo-SP
2014/2015	Curso de especialização em Operação de Unidade de Processo de Refino “Técnico de Operação” Universidade PETROBRAS
2015/2024	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Guaratinguetá

de modo especial aos meus pais, Jair e Maria, aos meus irmãos, Tiago e Talita e a minha esposa Larissa, que sempre me apoiaram para eu ter condições de chegar ao fim dessa etapa com sucesso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a DEUS, e agradeço também, a minha esposa, Larissa, por todo apoio, amor, carinho, compreensão e paciência para os inúmeros dias de guerra que tive durante o período de graduação.

a minha família, meus pais Jair e Maria, meus irmãos Tiago e Talita, minha sobrinha, Ana Livia, que sempre me deram amor, incentivo e motivos bons para a vida.

ao meu primo Bruno, que foi um diferencial em apoio técnico de estudo as matérias de Tecnologia da Informação.

aos meus amigos Adan e Wellington, que iniciaram comigo minha carreira técnica na escola Senai, fortificando minha batalha com apoio, incentivo, alegria, amizade e admiração.

ao meu orientador Prof. Dr. João Andrade de Carvalho de Júnior, pela grande pessoa que é, humilde, como amigo, professor, aconselhador e exemplo de sucesso acadêmico.

e, a todos os profissionais e professores da UNESP Guaratinguetá pelo imenso aprendizado que tive durante esses últimos anos.

“Acredite que você pode, assim você já está no meio do caminho”.

Theodore Roosevelt

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo em pesquisa bibliográfica e literatura sobre refino de petróleo. Citando brevemente os processos mais comuns em uma planta de refino e especificando de forma mais detalhada a importância da unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado nas plantas industriais, com uma descrição de sua evolução, criação e desenvolvimento. Têm-se que o desenvolvimento do processo de craqueamento catalítico fluidizado alavancou-se durante a Segunda Guerra Mundial. Por ser um processo físico-químico, consegue transformar produtos pesados (geralmente menor valor agregado) em produtos leves (de alto valor agregado e de consumo em grande escala), permitindo retorno financeiro e quantitativo mesmo em processos com refino de óleo pesado. Além disso, consegue contribuir de forma significativa no balanço de energia da refinaria com reaproveitamentos internos e geração energética em potencial relevante, tanto térmico como elétrico, além de permitir na atualidade o reprocessamento de resíduos como parte da carga da unidade, mitigando descartes ao meio ambiente, resolvendo a logística para fins de produtos não mais úteis ao processo de refino, ou para fins de produtos que viriam a estar novamente na carga de entrada da refinaria na unidade de destilação, conseguindo assim usufruir de forma ótima e prática das instalações e do processo já presentes para o funcionamento local.

PALAVRAS-CHAVE: Refino; Craqueamento Catalítico Fluidizado; Petróleo.

ABSTRACT

This paper presents a study in bibliographic research and literature on petroleum refining. Briefly mentioning the most common processes in a refining plant and specifying in more detail the importance of the Fluidized Catalytic Cracking unit in industrial plants, with a description of its evolution, creation and development. It is said that the development of the fluidized catalytic cracking process was leveraged during World War II. As it is a physical-chemical process, it can transform heavy products (generally lower added value) into light products (high added value and large-scale consumption), allowing financial and quantitative return even in processes with heavy oil refining. Furthermore, it can contribute significantly to the refinery's energy balance with internal reuse and energy generation with relevant potential, both thermal and electrical, in addition to currently allowing the reprocessing of waste as part of the unit's load, mitigating disposal into the environment, resolving the logistics for products that are no longer useful for the refining process, or for products that would once again be in the refinery's input load in the distillation unit, thus being able to make optimal and practical use of the facilities and process already present for local operation.

KEYWORDS: Refinement; Fluidized Catalytic Cracking; Petroleum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação do Petróleo na oferta energética mundial (2012)	16
Figura 2 – Refinaria Landulpho Alves (RLAM)	19
Figura 3 – Frações básicas de refinação e suas aplicações em produtos de petróleo	21
Figura 4 – Refinaria Henrique Lage (REVAP) - Destilação	22
Figura 5 – Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) - Armazenamento de Coque ...	23
Figura 6 – Refinaria Henrique Lage (REVAP) - FCC	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – As refinarias brasileiras: início de operação e capacidade atual (2009)	20
Tabela 2 – Aplicações comerciais das frações de coqueamento retardado	24
Tabela 3 – Exemplos de rendimentos e de características de frações de FCC	29, 37
Tabela 4 – Aplicações comerciais das frações de FCC	30, 36
Tabela 5 – Aplicações comerciais das frações de coqueamento retardado	37
Tabela 6 – Exemplo de rendimentos e de características de frações de coqueamento retardado	38
Tabela 7 – Comparação entre o investimento de diversas unidades de refino	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo
BPD	Barris de Petróleo por dia
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CENPES	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
DEA	DiEtanolAmina
FCC	Craqueamento Catalítico Fluidizado
GC	Gás Combustível
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HDT	Hidrotratamento
LCO	Óleo Leve de Reciclo
OD	Óleo Decantado
ODES	Óleo Desasfaltado
RASF	Resíduo Asfáltico
RAT	Resíduo Atmosférico
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
REVAP	Refinaria Presidente Henrique Lage
RLAM	Refinaria Landulpho Alves
RV	Resíduo de Vácuo
UCR	Unidade de Coqueamento Retardado
US	Estados Unidos da América

SUMÁRIO

1	OBJETIVO	13
2	DEFINIÇÕES E PANORAMAS ATÉ OS DIAS ATUAIS	14
2.1	O PETRÓLEO	14
2.2	PANORAMA DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO	14
2.3	O BRASIL ATUAL, EXPLORAÇÃO E REFINO	16
3	PROCESSOS DE REFINO	18
3.1	O REFINO	18
3.2	OBJETIVO DO REFINO	19
3.3	O DESENVOLVIMENTO DO REFINO NO BRASIL	20
3.4	OS PRINCIPAIS PROCESSOS DE REFINO	20
3.4.1	Destilação	21
3.4.2	Desasfaltação a Propano	22
3.4.3	Coqueamento Retardado	23
3.4.4	Hidrotratamento	24
3.4.5	Reforma Catalítica	25
3.4.6	Craqueamento Catalítico Fluidizado	25
4	ESSÊNCIA DO CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO	27
4.1	HISTÓRIA DO PROCESSO DE FCC	27
4.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO, RENDIMENTOS E APLICAÇÕES	28
4.3	PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS E ESFERAS	32
4.4	APROVEITAMENTOS ENERGÉTICOS	34
5	FCC EM RELAÇÃO AO COQUEAMENTO RETARDADO	36
6	ESTUDO DE CASO	40
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	44

1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é enfatizar a importância do craqueamento catalítico fluidizado dentro dos variados processos presentes em uma planta local, com uma descrição da sua evolução e do motivo de sua criação e desenvolvimento. Descrevendo os principais processos e produtos do refino e assim mostrando então a relevância do craqueamento em transformações de óleos pesados em leves, definindo o que são processos conhecidos como fundo de barril e sua importância nos dias de hoje, o que inclui o craqueamento catalítico fluidizado. Enfatizando as suas vantagens como processamento de resíduos químicos, reprocessamento de hidrocarbonetos em etapas diferentes do processo, aproveitamentos energéticos dentro da unidade, geração energética em potencial relevante dentro da refinaria, tanto térmico como elétrico, boa qualidade dos produtos gerados, incluindo produtos utilizados como carga nas indústrias químicas e a boa eficiência do processo.

2 DEFINIÇÕES E PANORAMAS ATÉ OS DIAS ATUAIS

2.1 O PETRÓLEO

O petróleo é definido pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) da seguinte forma: “Todo e qualquer hidrocarboneto líquido em seu estado natural, a exemplo do óleo cru e condensado”.

É ainda, assim definido como “Uma mistura de ocorrência natural, consistindo predominantemente em hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e oxigenados e outros elementos” (FARAH, 2013).

A elevada proporção de carbono, em especial, e hidrogênio em relação a outros componentes do petróleo, deixa claro que os hidrocarbonetos são os principais componentes, alcançando mais de 90% de sua composição. Os outros componentes geralmente são derivações de enxofre e em menor escala temos oxigênio, nitrogênio e metais.

2.2 PANORAMA DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

O petróleo já era conhecido na antiguidade, mas a sua exploração e refino somente se tornaram expressivos no final do século XIX, primeiramente com a produção de querosene, que substituiria o óleo de baleia, utilizado para iluminação, e, definitivamente, com o advento dos motores de combustão interna, operando segundo o ciclo Otto, que deram origem à demanda de gasolina (NILO INDIO, 2014).

Ao se produzir querosene, se descobriu o valor da fração mais pesada, então residual, como combustível para uso em caldeiras e no aquecimento, em substituição ao carvão, e assim surgiu o óleo combustível, que foi usado primeiramente na indústria e, mais adiante, no comércio e em residências (NILO INDIO, 2014).

O óleo diesel só veio a encontrar um mercado consumidor a partir de 1919, quando o empresário Clessie Cumins, em Columbia, nos Estados Unidos, melhorou os motores que operavam no ciclo Diesel e fundou a Cummins Engine Co. e, em 1929, viabilizou o uso de desse combustível em veículos automotores (NILO INDIO, 2014).

Finalmente, para citar os derivados de petróleo mais importantes nos dias atuais, em termos de definição dos chamados esquemas de refino, em 1939, Hans von Ohain desenvolveu na Alemanha a primeira turbina de aviação bem-sucedida, que usava gasolina

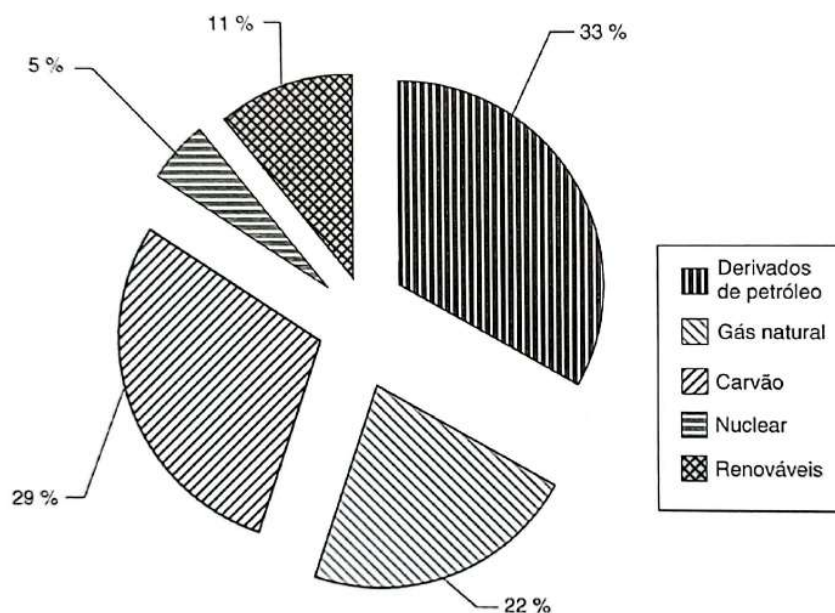
como combustível. No entanto, em 1941, em vista da escassez desse derivado, em função da Segunda Guerra mundial, o inglês Frank Whittle desenvolveu uma turbina de aviação que utilizava o querosene iluminante como combustível. Nasceu assim o querosene de aviação, que mais tarde teria que atender a rígidas especificações, em vista da sua importância para segurança de voo (NILO INDIO, 2014).

No século XIX e nos primeiros anos do século XX, o refino de petróleo consistia apenas no processo de destilação à pressão atmosférica, no qual o petróleo cru era separado em frações com diferentes faixas de ebulição. No entanto, com a descoberta de maiores reservas de óleo e com o crescimento do mercado já visualizado para os combustíveis automotivos, essa configuração de refino não era economicamente atrativa, e, por isso, muitos pesquisadores trabalharam na melhoria dos processos de refino, visando um maior aproveitamento da matéria-prima, traduzido pela redução da produção de óleo combustível (NILO INDIO, 2014).

Dessa busca, nasceram os chamados processos de fundo de barril, sendo o pioneiro, e de grande importância até os nossos dias, o craqueamento catalítico, desenvolvido em sua primeira versão em 1915 e melhorado continuamente ao longo do século, o que tornou possível aumentar a produção de gasolina e melhorar o seu desempenho nos motores (NILO INDIO, 2014).

Ao longo do século XX foram sendo introduzidos outros processos de refino, importantes tanto para a adequação dos volumes de derivados produzidos ao mercado consumidor como para o atendimento aos requisitos de desempenho que foram sendo estabelecidos com o avanço tecnológico dos equipamentos, principalmente os motores automotivos. Enquanto os processos de craqueamento contribuíram para o aumento da produção de gasolina e de diesel, os processos de reforma e alquilação catalítica auxiliaram na melhoria da qualidade de combustão da gasolina, e os processos de tratamento foram importantes para o ajuste final das características de todos os derivados. Nos dias de hoje, os processos de hidrorrefino estão entre os de maior importância, porque conferem grande flexibilidade ao refino, permitindo o processamento de petróleos mais baratos e viabilizando o atendimento às crescentes exigências ambientais e de saúde ocupacional. Finalmente, as unidades de tratamento de efluentes líquidos, sólidos ou gases assumem hoje posições de destaque por viabilizarem o desenvolvimento sustentável do refino. Dessa forma, a indústria do petróleo e gás natural conquistou o primeiro lugar como fonte energética mundial (NILO INDIO, 2014).

Figura 1 – Participação do Petróleo na oferta energética mundial (2012)



Fonte: NILO INDIO, 2014

2.3 O BRASIL ATUAL, EXPLORAÇÃO E REFINO

Em 2006, a Petrobras anunciou que o Brasil tinha se tornado autossuficiente em petróleo no quesito exploração, ou seja, produziríamos o mesmo que consumiríamos. Mas houve evoluções, e em 2023, foram extraídos aproximadamente 3,4 milhões de barris de petróleo por dia, o que é maior do que a nossa capacidade total de refino, que está em aproximadamente 2,3 milhões de bpd. Assim, respeitando o que foi realmente refinado, o excedente vai para exportação (ALEXANDRE VERSIGNASSI, 2024).

No quesito refino, de fato na prática final, ainda somos deficitários, como exemplos, em 2023 o Brasil comprou 14,7 bilhões de litros de diesel, o que representou aproximadamente 22,4% do diesel que foi consumido internamente. Dos 33,3 bilhões de litros de gasolina consumidos em 2023 (já descontando os 27,5% de etanol que vão no combustível dos postos), 4,2 bilhões vieram de importação, o que seria aproximadamente 12,5% (ALEXANDRE VERSIGNASSI, 2024).

Esses números mostram que atualmente o Refino Brasileiro ainda precisa de grandes investimentos para garantir autossuficiência local, e pelos elevados números demonstra a tamanha importância que o refino tem no contexto Petróleo e todas suas etapas de produção, já que produto final tem maior valor agregado que produto bruto.

Considerando o cenário, temos como reforço a tese que os chamados processos de fundo de barril, são realmente de grande importância nos dias atuais, pois são processos que transformam óleos pesados em óleos leves, contribuindo a mitigação do déficit atual, mesmo a carga para o refino sendo mais pesada, o que é mais comum para as características do petróleo brasileiro.

3 PROCESSOS DE REFINO

3.1 O REFINO

O ato de refinar pode ter várias definições, como tornar mais fino, mais puro, mais intenso, mais apurado, etc. Do ponto de vista químico, seria o separar de uma substância as matérias que lhe alteram a pureza, ou seja, uma segregação de substâncias, onde os elementos finais tem características físicas e químicas de singular afinidade.

O petróleo, em seu estado natural, não pode ser aproveitado de forma prática para outros fins que não o de fornecimento de energia via combustão. Porém, sua composição química baseada em hidrocarbonetos de grande heterogeneidade molecular abre caminhos para usos industriais especializados e sofisticados, como o requerido pelas modernas máquinas de combustão interna (NILO INDIO, 2014).

Logo, uma refinaria de petróleo não é uma unidade independente. Ela está inserida em contexto industrial que condiciona suas decisões aos seguintes grupos de restrições:

– do ponto de vista da matéria-prima, são impostas restrições de disponibilidade e qualidade associadas aos campos produtores, concernentes à logística de recebimento (oleodutos, transporte marítimo etc.) e às características físico-químicas dos petróleos (NILO INDIO, 2014).

– do ponto de vista da venda dos produtos de refino, existem restrições de qualidade e quantidade requeridas pelos mercados consumidores, além de questões associadas à logística de distribuição (NILO INDIO, 2014).

Tais restrições não são permanentes, mas sujeitas as mudanças ao longo do tempo, em função de condicionantes como as cotações e a disponibilidade dos petróleos, assim como da valoração e da demanda dos derivados (NILO INDIO, 2014).

A partir de qualquer petróleo podem-se obter quaisquer dos seus derivados, desde que haja na refinaria processos adequados para tal. Assim, o que difere o refino, de um petróleo para outro, são os processos necessários para viabilizar a obtenção dos derivados desejados, o que se reflete nos custos do seu processamento. O tipo de petróleo determina o grau de refino necessário para a produção das quantidades e tipos de derivados desejados, e o seu valor comercial depende de sua qualidade (FARAH, 2013).

3.2 OBJETIVO DO REFINO

Uma refinaria de petróleo, ao ser planejada e construída, pode ser classificada em três grupos, de acordo com seu objetivo básico: produção de combustíveis, produção de óleos básicos lubrificantes e parafinas e produção de matérias-primas para indústrias petroquímicas (NILO INDIO, 2014).

O primeiro grupo constitui a maioria dos casos, já que combustíveis tem uma demanda muito maior que outros derivados. É fundamental, termos produção de GLP, gasolina, querosene de aviação, óleo diesel, óleo combustível e cimento asfáltico de petróleo para suprir o mercado consumidor (NILO INDIO, 2014).

O segundo grupo, de menor demanda, pois foca em lubrificantes e parafinas, tem maior valor agregado, aumentando então o lucro. Porém são de maior complexidade, dificultando o processo e os custos operacionais (NILO INDIO, 2014).

O terceiro grupo, embora possa produzir combustíveis, foca em geração de insumos básicos para indústria petroquímica, como olefinas e aromáticos, permitindo a produção de polímeros geralmente (NILO INDIO, 2014).

O Brasil em si, encontra-se em maioria no primeiro grupo, mas tem processos paralelos em algumas refinarias que permitem produções do grupo dois e três.

Figura 2 – Refinaria Landulpho Alves (RLAM)



Fonte: Mika/Banco de Imagens Petrobras, 2024

3.3 O DESENVOLVIMENTO DO REFINO NO BRASIL

O desenvolvimento da indústria de petróleo no Brasil começou em meados de 1930, com início de formulação de lubrificantes pela Esso. Em 1937, teve-se o início de operação da refinaria Riograndense com capacidade de 240m³/d de petróleo (NILO INDIO, 2014).

Tabela 1 – As refinarias brasileiras: início de operação e capacidade atual (2009)

Refinaria	UF	Início de operação	Capacidade atual (m ³ /d)
Riograndense ^a	RS	1937	2500
Landolfo Alves de Mataripe – RLAM	BA	1950	49 300
Presidente Bernardes Cubatão – RPBC	SP	1954	28 400
Capuava – RECAP ^b	SP	1955	8500
Manaus – REMAN ^b	AM	1956	7300
Duque de Caxias – REDUC	RJ	1960	38 000
Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste – LUBNOR ^c	CE	1966	1300
Planalto Paulista – REPLAN	SP	1971	66 000
Getúlio Vargas – REPAR	PR	1977	33 000
Gabriel Passos – REGAP	MG	1970	25 000
Alberto Pasqualini – REFAP	RS	1970	32 000
Henrique Lage – REVAP	SP	1980	40 000
Potiguar Clara Camarão – RPCC ^d	RN	2009	6000

^aEx-Ipiranga; ^bIncorporadas à Petrobras em 1974; ^cAté 1998, produzia somente asfalto e óleos combustíveis, e era denominada ASFOR; ^dImplantação da refinaria no Rio Grande do Norte.

Fonte: NILO INDIO, 2014

Pela tabela 1 verifica-se que na década de 1950 a indústria do refino teve um grande impulso. Tivemos também como datas importantes o ano de 1953, que com estabelecimento do monopólio da União Federal sobre as atividades integrantes da Indústria do petróleo, foi sancionada a lei Federal nº 2004, já com a previsão de criação de uma empresa estatal para execução desse monopólio, sendo criada então a Petrobras. E também o ano de 1966, quando foi criado o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), atualmente o maior centro de pesquisas da América Latina, da Petrobras e suas empresas subsidiárias (NILO INDIO, 2014).

3.4 OS PRINCIPAIS PROCESSOS DE REFINO

Os processos de refino podem ser divididos em três grandes grupos. Que seriam os processos de separação, que ocorre quando os componentes da carga são separados por algum processo físico, ou processos de conversão, quando os componentes da carga são transformados em outros componentes por processos químicos ou catalíticos, ou processos de tratamento, quando se retiram ou transformam os contaminantes da carga.

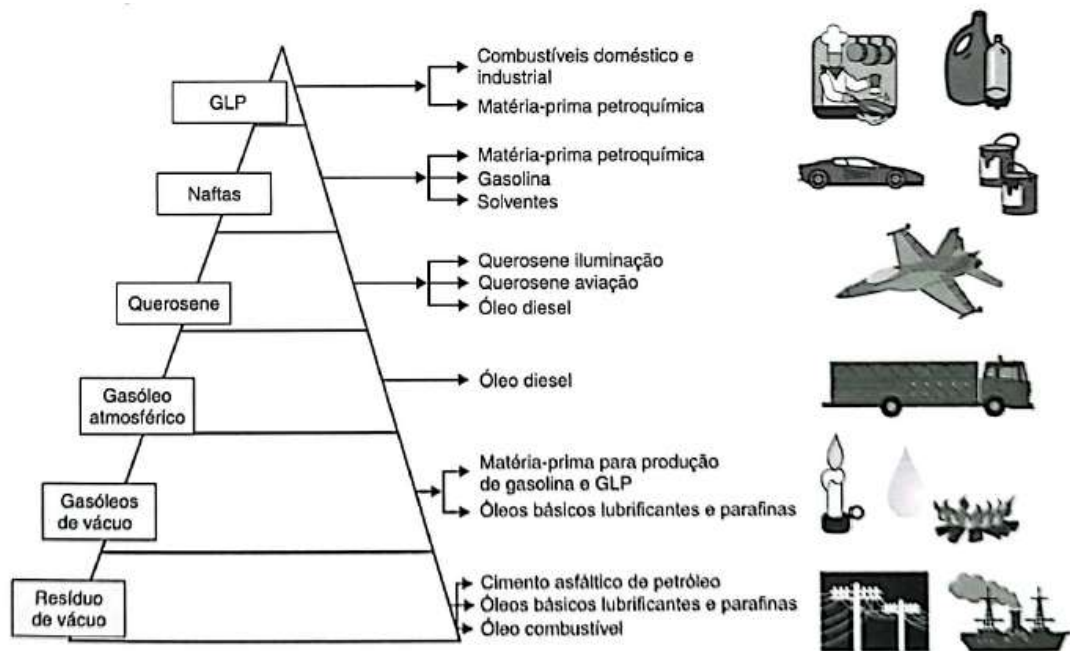
3.4.1 Destilação

É um processo de separação, básico em uma refinaria. Separa-se os hidrocarbonetos por diferença de temperatura de ebulição. Por ser versátil, é muito utilizado em refinarias e indústrias químicas. Dois tipos são comuns em refinarias:

– destilação atmosférica: fraciona o petróleo em GLP, naftas, querosene, gasóleos atmosféricos e resíduo atmosférico (RAT).

– destilação a vácuo: fraciona a parte pesada da destilação atmosférica, o resíduo atmosférico, em correntes de gasóleos de vácuo e resíduo de vácuo, que são matéria-prima para unidades de conversão como FCC e Coqueamento Retardado e de separação, como Desasfaltação.

Figura 3 – Frações básicas de refinação e suas aplicações em produtos de petróleo



Fonte: FARAH, 2013

A maioria das refinarias tem os dois tipos de destilação. Mesmo não havendo refino sem unidades de destilação, existem algumas que dependendo da carga, só tem destilação atmosférica ou destilação a vácuo.

Figura 4 – Refinaria Henrique Lage (REVAP) - Destilação



Fonte: Mika/Banco de Imagens Petrobras, 2024

3.4.2 Desasfaltação a Propano

É um processo de separação por extração que visa fisicamente segregar as frações oleosas da parte asfáltica do resíduo de vácuo. Com a origem dos processos chamados “fundo de barril”, além da geração de carga para produzir lubrificantes e cimento asfáltico de petróleo (asfalto) passou a gerar carga para FCC, o que valorizou em peso frações pesadas do petróleo. Com auxílio de solvente, do propano ao pentano, segrega asfaltenos e resinas de frações oleosas. A fase oleosa, também conhecida como óleo desasfaltado (ODES), pode não só incorporar a carga do FCC, como vir a produzir óleos lubrificantes. A fase resinosa, também conhecida como resíduo asfáltico (RASf), pode ser usada para produzir cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou óleo combustível, ou ainda complementar a carga da unidade de coqueamento retardado (UCR).

3.4.3 Coqueamento Retardado

É também um processo de conversão, de craqueamento térmico, que utiliza geralmente como carga principal o resíduo de vácuo. Seu processo surgiu em 1929 com a implantação da primeira unidade industrial da Standard Oil (Indiana). Mas de forma rentável e prática só teve um crescimento significativo em 1955 com muitas adequações da unidade (NILO INDIO, 2014). Ele é também um processo chamado “fundo de barril”, pois converte resíduo de vácuo em produtos leves e coque, e acaba habilitando as refinarias a processarem cargas mais pesadas e de menor valor comercial.

A Unidade de Coqueamento Retardado (UCR), tem a carga submetida a temperatura de aproximadamente 500°C por um pequeno intervalo de tempo, onde as moléculas de hidrocarboneto de alta massa molar são quebradas, gerando gases, nafta, gasóleos e coque. Apesar no nome Coque, o mesmo é um elemento secundário na produção. Mas pelo seu destaque em volume e cor, gera no pátio da unidade ou próximo desta, pilhas de coque, que acabam se destacando.

Figura 5 – Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) - Armazenamento de Coque



Fonte: Mika/Banco de Imagens Petrobras, 2024

É salutar enfatizar que em tempos passados o coque era vendido a preço de carvão mineral, mas hoje em dia, há um grande interesse do mercado em seu consumo, assim, até o coque se tornou bem rentável. Atualmente, dependendo do tipo, ele pode ser utilizado como combustível e produção de eletrodos. Com o crescente consumo de volume de produtos leves, a unidade passou a ser muito cogitada nos dias atuais em projetos de ampliação ou construção de refinarias, em especial para otimizar produção de diesel.

Como a carga desse processo é mais pesada que a de FCC, e não é um processo catalítico, as frações obtidas apresentam menores rendimentos e maiores teores de enxofre se comparados aos do FCC e precisam ser estabilizados em processos de hidrotratamento para melhoria das qualidades dos produtos, devido principalmente o elevado teor de diolefinas (FARAH, 2013).

Tabela 2 – Aplicações comerciais das frações de coqueamento retardado

Fração	Faixa de destilação (°C)	Principais aplicações comerciais
Gás combustível	Abaixo de -42	Gás combustível
Gás liquefeito do petróleo	-42 a 0	Gás combustível doméstico e industrial
Nafta de coqueamento	32 a 220	Gasolina – solventes, nafta petroquímico, após hidrotratamento;
Gasóleo leve de coqueamento	220 a 340	Óleo diesel, após hidrotratamento; óleo combustível
Gasóleo pesado de coqueamento	340 em diante	Óleo combustível
Coque	-	Produção de anodos para a produção de alumínio ou de eletrodos para a produção de aço; geração de energia

Fonte: FARAH, 2013

3.4.4 Hidrotratamento

O processo de Hidrotratamento (HDT) vem ocupando destaque atualmente, devido questões ambientais e exigências de qualidades de produtos. Como exemplos, reduções dos teores de enxofre e estabilidade química na gasolina, querosene de aviação e diesel.

É um processo dinâmico, pois habilita tratamento e estabilização de produtos, como compostos olefinicos e aromáticos vindo da destilação, craqueamento catalítico e coqueamento retardado. Como nos dias atuais a pressão da sociedade para diminuição de óxidos de enxofre é grande, e as descobertas de petróleos estão cada vez mais pesados e com elevada sujidade (contaminantes), esses dois fatores acabaram impulsionando a maior prática desse processo em refinarias. Em paralelo, a geração de hidrogênio baixou o custo atualmente, viabilizando-o, já que o processo é baseado na reação de leitos catalíticos do

hidrogênio com os contaminantes presentes nas frações de petróleo, a pressões e temperaturas elevadas. Com o aumento da tecnologia e um processo severo de acompanhamento, as unidades de HDT seguem cada vez mais presentes para atender as legislações atuais. Assim, de forma resumida, pode-se ter reações de remoção de compostos sulfurados, nitrogenados e oxigenados, além de saturação de olefinas e aromáticos.

O gásóleo de coqueamento é a carga mais suscetível a melhorar a qualidade de ignição. Somando essa carga ao gásóleo atmosférico da destilação, e o óleo leve de diluição do FCC, temos a carga para as unidades denominadas HDT de instáveis, um tipo comum de HDT atual (FARAH, 2013).

3.4.5 Reforma Catalítica

É também um processo de conversão devido a exigência de qualidade da gasolina. A carga é uma junção de nafta de destilação e nafta de coque após hidrotratamento. As mesmas que são ricas em parafinas e naftênicos são transformadas em sua maioria em aromáticos. Assim, melhora-se o número de octano e permite-se em paralelo a produção de aromáticos leves como o benzeno, tolueno e xilenos.

O processo também gera gás combustível, GLP e uma corrente rica em hidrogênio, que pode ser usada em unidades de hidrotratamento. Essa nafta reformada é excelente para compor a gasolina, já que possui elevado número de octano (alta qualidade antidetonante), baixo teor de olefinas e é praticamente isenta de enxofre.

Na gasolina em si, temos outras correntes, como:

- naftas destiladas, dessulfurizadas. Estas apresentam baixo número de octano e baixo teor de olefinas (NILO INDIO, 2014).
- naftas craqueadas, hidrodessulfurizadas de forma seletiva. Estas apresentam elevado número de octano (alto teor de olefinas) (NILO INDIO, 2014).
- naftas de coque, craqueadas, hidrodessulfurizadas. Estas apresentam baixo número de octano e baixo teor de olefinas (NILO INDIO, 2014).

3.4.6 Craqueamento Catalítico Fluidizado

O processo de Craqueamento Catalítico Fluidizado (FCC) ocupa um papel de destaque no refino por sua atratividade devido à elevada produção de frações leves a partir de frações pesadas, o que lhe confere grande rentabilidade. A carga de processo,

dependendo do tipo de petróleo, pode ser gasóleo de vácuo ou resíduo atmosférico, os quais são transformados em frações mais leves do que a carga como o GLP, a nafta e o óleo leve de reciclo. O FCC faz parte do grupo de processos chamados de “fundo de barril” (FARAH 2013).

O craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC) é considerado um processo de quebra molecular, tendo como principal carga os gasóleos produzidos na unidade de destilação a vácuo. Por meio de severas condições de temperatura, em presença de catalisador, as moléculas da carga são decompostas em outras mais simples, produzindo gás combustível, GLP, nafta, gasóleo leve e óleo decantado (fração residual). As reações geram também coque, que se deposita no catalisador, e é queimado na etapa de regeneração do mesmo. Atualmente, alguns projetos contemplam a utilização de resíduos atmosféricos como carga, desde que a carga combinada atenda aos limites de projeto da unidade quanto aos teores de asfaltenos e de metais (NILO INDIO, 2014).

O FCC é uma unidade de conversão, catalítica, o que lhe permite um melhor controle de reação em relação ao craqueamento térmico, otimizando as frações dentro dos ranges do processo conforme esperado pela programação de produção.

Na atualidade, com o aumento da tecnologia e desenvolvimento do processo, chega-se a se ter mais de 80% da carga convertida em produtos leves.

Figura 6 – Refinaria Henrique Lage (REVAP) - FCC



Fonte: Mika/Banco de Imagens Petrobras, 2024

4 ESSÊNCIA DO CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO

4.1 HISTÓRIA DO PROCESSO

O processo de craqueamento catalítico fluido (FCC) é sem dúvida o coração da refinaria e pode ser considerado um dos mais importantes processos da Indústria química. Este processo converte resíduos atmosféricos pesados e destilados de vácuo em frações mais valorizadas tais como gasolina, diesel, querosene e GLP (EDUARDO FALABELLA, 2017).

No início do século 19, as lâmpadas para iluminação interna muitas vezes utilizavam óleo de baleia como combustível. Iluminantes à base de petróleo tais como lampiões começaram a substituir o óleo de baleia em torno de 1850, dando origem a uma indústria emergente que produzia querosene a partir do refino de óleo cru. Por volta do fim do século a indústria automotiva, em crescimento, propiciou um uso alternativo a frações leves de petróleo, principalmente gasolina. Logo o fornecimento de gasolina de destilação direta como combustível para motores automotivos se tornou insuficiente. Por esta razão, a indústria do petróleo começou a buscar processos alternativos objetivando aumentar a produção de frações mais leves. Este fato foi a força motriz para o primeiro processo de craqueamento, o craqueamento Térmico¹. O processo de craqueamento térmico (também conhecido como “processo de craqueamento Shukhov”) foi inventado pelo engenheiro russo Vladimir Shukhov e patentado em 1891 no Império Russo, patente nº 12926, em 27 de novembro de 1891. Mais tarde, este processo foi modificado pelo engenheiro americano William Merriam Burton e patentado como patente norte americana U.S. 1.049.667 em 8 de junho de 1908 (EDUARDO FALABELLA, 2017).

À medida que motores mais novos e mais potentes foram sendo desenvolvidos, foi exigida gasolina de mais alta octanagem. Além disso, motores de avião necessitavam de combustível com índices de octanas próximos de 100. Tais características não poderiam ser obtidas através do processo tradicional de craqueamento térmico. Portanto, a descoberta de um processo de craqueamento mais eficiente, pelo engenheiro francês Eugene Houdry nos anos 1920, permitiu que as refinarias produzissem gasolina de octanagem mais elevada, permitindo igualmente um aumento no fornecimento da mesma. Este processo foi denominado craqueamento catalítico (conhecido como “craqueamento catalítico de leito fixo de Houdry”), já que reações de craqueamento eram promovidas por um catalisador sólido³. O processo compreendia vários reatores separados atuando como um processo

cíclico, ou melhor, enquanto em alguns reatores ocorria craqueamento, em outros o catalisador sofria regeneração por queima de coque com ar. O conceito de craqueamento térmico foi aperfeiçoado adicionalmente pelo craqueamento catalítico Thermofor da Mobil (Tcc), no qual um leito móvel de catalisador com um macrocatalisador (esferas com diâmetro de 1,5-2mm) era usado. O sistema de leito móvel aumentou o rendimento de gasolina em 15% em relação ao sistema de leito fixo (EDUARDO FALABELLA, 2017).

O conhecimento sobre leitos fluidizados junto com a preparação de catalisador em partículas finas foi a base para o desenvolvimento do processo de craqueamento catalítico fluido (FCC). O uso de partículas pequenas oferecia vantagens em termos de transferência de calor e difusão de massa em relação às grandes pelotas de catalisador usadas tanto em leito fixo como em Tcc. A primeira unidade de FCC iniciou em maio de 1942, na refinaria da Standard Oil de New Jersey em Baton Rouge, Louisiana. A enorme demanda por combustíveis para motor e aviação devida à 2ª Guerra Mundial ajudou a estabelecer este processo. Na verdade, entre 1942 e 1945, 34 novas unidades foram postas em andamento (EDUARDO FALABELLA, 2017).

O aperfeiçoamento da tecnologia de FCC foi efetuado através de vários tipos de reatores. De fato, o primeiro foi um reator de fluxo ascendente Modelo I FCC, seguido pelo reator de fluxo descendente Modelo II FCC. Foram igualmente desenvolvidos o projeto de reator empilhado, esse Modelo IV e o riser reto. Por fim, o projeto side-by-side com riser reto, melhor para unidades grandes, foi comercializado em 1950 (EDUARDO FALABELLA, 2017).

4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO, RENDIMENTOS E APLICAÇÕES

Em um processo de craqueamento catalítico fluidizado, a carga recebe a adição de catalisador a elevada temperatura no *riser*, tubulação onde ocorrem as reações e que transporta o óleo para o reator-separador, no qual o catalisador é separado da carga craqueada nos ciclones. A pressão de operação é baixa e a temperatura de reação se situa na faixa de 500°C a 540°C. O catalisador gasto segue para o regenerador, onde será recuperado pela remoção do coque nele depositado, o qual é oxidado a CO₂. A carga craqueada, que está na fase vapor, segue para a fracionadora, onde será separada em diversas frações. A unidade de craqueamento catalítico é composta pelas seções de reação ou conversão, de fracionamento, de recuperação de gases, onde são separados gás combustível, GLP e Nafta,

e, ainda, pela seção de tratamentos, onde são tratadas as correntes de gás combustível, GLP e nafta para remover os contaminantes presentes (FARAH, 2013).

Tabela 3 – Exemplos de rendimentos e de características de frações de FCC

Produtos	Propriedades e rendimentos	Carga gasóleo	Carga resíduo atmosférico
GLP	Rendimento, % volume	20 a 25	16 a 20
	Mercaptanos (mg/kg)	275	300
	Enxofre total (mg/kg)	400	500
Nafta	Rendimento, % volume	50 a 60	45 a 55
	Mercaptanos (mg/kg)	400	600
	Enxofre total (mg/kg)	1300	2000
	Número de octano motor	82 a 85	80 a 82
	Número de octano pesquisa	93 a 95	93 a 95
LCO	Rendimento, % volume	7 a 15	10 a 20
	Enxofre total, % massa	3,0	3,5
OD	Rendimento, % volume	5 a 10	8 a 15
	Enxofre total, % massa	5,0 a 6,0	6,0 a 8,0

Fonte: FARAH, 2013

As frações do processo de craqueamento catalítico são constituídas por hidrocarbonetos parafínicos (normais e ramificados), naftênicos, olefínicos (normais, ramificados, mono e di) e aromáticos, com predomínio dos dois últimos tipos. Por conter hidrocarbonetos aromáticos e parafínicos ramificados, a nafta de craqueamento apresenta ótima qualidade antidetonante. No entanto, sua estabilidade pode ser comprometida pela presença de diolefínicos, necessitando ser hidrotratada para sua estabilização e remoção dos compostos sulfurados. O óleo leve de reciclo contém grande parcela de aromáticos e de contaminantes, o que obriga a sua estabilização em unidades de hidrotratamento, para ser adicionado ao óleo diesel. O óleo decantado apresenta elevado conteúdo de hidrocarbonetos aromáticos, podendo ser adicionado ao óleo combustível industrial ou servir como matéria-prima para produção de negro de carbono (FARAH, 2013).

Tabela 4 – Aplicações comerciais das frações de FCC

Fração	Faixa de destilação (°C)	Principais aplicações comerciais
Gás combustível	Abaixo de -42	Gás combustível; matéria para petroquímica
Gás liquefeito do petróleo	-42 a 0	Combustível doméstico e industrial; obtenção de gasolina de aviação
Nafta de craqueamento	32 a 220	Gasolina
Óleo leve de reciclo	220 a 340	Óleo diesel; óleo combustível
Óleo decantado	340 em diante	Resíduo aromático; obtenção de negro de carbono
Coque	-	Totalmente queimado no regenerador

Fonte: FARAH, 2013

A tabela 3 mostra que o principal produto de FCC é a Nafta, produto base para produção de gasolina conforme tabela 4. Notamos um rendimento de mais de 50% da carga em volume. No Brasil, esse fato enfatiza o quanto as unidades de FCC podem vir a contribuir para o inventário de gasolina do país no quesito quantidade, já que as frotas de carros são movidas especialmente a modelos flex (álcool ou gasolina) ou modelos a gasolina. E também no quesito qualidade, já que apresentam alto número de octano (qualidade antidetonante). Também mostra uma margem de rendimento variável entre 50% a 60%, o que na prática permite a unidade ajustes de forma a otimizar produções conforme demanda, respeitando sempre a qualidade do petróleo e possíveis limitações por inúmeros motivos. Apesar de em percentual poucos por cento não parecem muito, em unidades de refino que trabalham em larga escala, podem significar milhões a mais a cada dia, semana ou mês. Como exemplo, uma unidade que processa 10 milhões de litros por dia, 5% significam 500 mil litros diários, e 15 milhões mensais, o que torna significativo no quesito resultado e rentabilidade. Com o avanço tecnológico somado ao tipo de processo, catalítico, tem-se essa dinâmica para as frações produzidas, otimizando assim ainda mais uma boa relação da unidade com a planta num todo. E o GLP e o LCO têm percentuais participativos significativos nas frações produzidas. Em média, somados dão 30% da carga em volume.

O GLP em grande escala é consumido em residências e indústrias como fonte de energia de combustão, conforme tabela 4, e quando segregado, a fase butano pode ser também agregada a gasolina (butanização da Nafta) respeitando as características químicas e físicas e os limites regulamentados pela ANP, para tal. Aumentando assim a produção de gasolina e melhorando sua octanagem.

A fase propano após segregação, pode ser utilizada como matéria prima para indústria petroquímica, para produção de polímero através do propeno. Apesar de nome propano,

como já citado, FCC produz em grande escala hidrocarbonetos olefínicos, o que acaba de forma significativa, gerando uma junção de propano e propeno, que uma vez separados, permite o uso específico do alceno para indústria química. O propeno é a principal matéria-prima para a produção de polipropileno, um plástico versátil utilizado em uma vasta gama de produtos, desde componentes automotivos até em embalagens em geral. Além de outros derivados químicos como óxido de propileno, o álcool isopropílico e o acetato de propila e um papel crucial na produção de resinas plásticas, fibras e elastômeros. Pela quantidade de produtos possíveis, mais o percentual do produto e o bom valor de mercado, o propeno se torna muito atrativo no ponto de vista financeiro, sendo um dos produtos que lideram a lucratividade do refino que possuem unidades de FCC.

Assim, notamos que o GLP, um dos derivados do FCC tem grande importância para o dia a dia, no quesito volume e no quesito valor.

O LCO, passando por hidrotreamento, pode ser aderido ao diesel, conforme tabela 4. Na realidade do Brasil, é especial a importância quantitativa, já que a frota de transporte de carga se baseia principalmente no transporte rodoviário, e atualmente apresenta déficit de produção em relação a demanda no parque de refino nacional. Além disto, conforme tabela 4, o mesmo pode agregar a produção de óleo combustível, que nos dias atuais, com a legislação cada vez mais exigente, tem dado bons resultados financeiros ao refino para produções com baixo enxofre. Como exemplo, óleo combustível utilizado em navios, como fonte de energia. Logo, este derivado de FCC é também de grande valia no quesito volume e valor.

Mesmo o óleo decantado (OD), apresentado na tabela 3 em percentual menor, tem sua importância, pois de toda a carga pesada que foi processada no FCC, aproximadamente de 5% a 10% deram como rendimento sua produção. O que na prática, tem um valor bom em volume para aderir a produção de óleo combustível demandado, otimizando sua qualidade e agregando ao total. É salutar que produtos leves tem maior demanda, mas os produtos pesados também têm sua demanda, menos significativa em volume, mas são presentes com bastante rigor na legislação ambiental, dando assim valor ao óleo pesado residual que não foi convertido no processo de FCC.

Apesar de não ter sido enfatizado na tabela 3 e tabela 4 do Sarah (2013), o gás combustível de refinaria (GC), é presente nos produtos de FCC, variando de 1% a 5% do volume da carga. O GC pode ser utilizado como combustível de refinaria, suprindo fornos e caldeiras, e na cogeração de energia no próprio parque. Ou pode ser utilizado como matéria

prima para indústria petroquímica, para produção de polímero através do eteno. O eteno é a principal matéria-prima para a produção de polietileno e de PVC.

O polietileno é um dos polímeros mais versáteis existentes, possuindo diversas aplicações, dentre as quais se destacam: filmes, sacolas plásticas, embalagens para a indústria de alimentos, frascos e recipientes para a indústria cosmética, engradados para bebidas, lonas, caixas d'água, fios e cabos elétricos, além de tubos para água e gás, tanques de combustível e entressolas de calçados (BRASKEM, 2014).

O PVC tem grande participação nos materiais plásticos presentes no nosso cotidiano, sendo muito utilizado na construção civil em forma de tubos e conexões, janelas, portas, pisos, forros e telhas.

Logo, os produtos derivados de FCC tem sua grande importância. Em especial a Nafta e o LCO para o Brasil, que aderem a produção de gasolina e diesel respectivamente, produtos que ainda são deficitários conforme já citado no item 2.3 do trabalho. E os gases alcenos, no caso, eteno e propeno, que tem um bom valor de mercado e servem de matéria-prima a indústria petroquímica.

4.3 PROCESSAMENTO DE RESÍDUO E ESFERAS

Na atualidade, com a modernização e aperfeiçoamento das unidades de craqueamento, o dinamismo da unidade com relação ao seu processo de conversão, permitiu além de cargas pesadas como gasóleo e ODES, por exemplo, processar resíduos. Unidades modernas já tendem a vir com bocais específicos para esse tipo de carga, ou em processos de parada geral de manutenção passar por adequações para tal fim. O grande porte das refinarias sempre tem como desafio manter a logística e a programação de produção alinhadas. Tanques e esferas de armazenamento ocupam grande espaço, exigem manutenção rigorosa para o quesito ambiente e segurança de processo, e são na prática um dos custos mais altos do refino. Assim, reprocessamento de carga não especificada, por critérios químicos ou critérios ambientais, que são uma realidade da rotina, podem ter a possibilidade de reprocessamento com brevidade, fazendo do craqueamento uma unidade coração, pois evita acúmulos de estoque, altos custos de transporte para locais possíveis de armazenamento ou tratamento, e ainda adere aos produtos finais maior quantidade de produção.

Para alguns tipos de resíduo, como derivados de hidrocarbonetos oleosos por exemplo, permitiria colocação desse produto na carga de entrada da refinaria, que compõe

o pool de entrada para destilação. Porém há uma grande perda de dinheiro, já que todo processo seria seguido passo a passo, ocupando inventário da carga nominal, desgastando estruturas, e atrasando produções. Para esses casos, processar essa carga no craqueamento, o mesmo ocorreria em paralelo a destilação, permitindo que a carga da refinaria continue em plenitude. Além disso, o FCC permite pontos de entrada específicos de resíduos, visando a qualificação dos produtos e o menor trajeto dentro da unidade.

Alguns exemplos de processamento ou reprocessamento de resíduo ou esferas em FCC:

- o reprocessamento de uma mistura de óleos, exigindo então segregação e tratamento, deve-se aderir esse inventário junto aos bocais de carga de resíduo do FCC, fazendo passar por quase todas etapas de processo.

- o reprocessamento de uma esfera contaminada mas especificada fisicamente, deve-se aderir a corrente após a etapa de recuperação de gases e ou diretamente a fase de tratamento do FCC, mitigando o trajeto desses gases em quase dois terços do processo como um todo.

- processamento de produto químico já saturado de processo de tratamento da unidade, como a DiEtanolAmina (DEA). A DEA é utilizada no processo de tratamento de GLP e GC com a finalidade de remover H₂S e o CO₂ contidos nas correntes. Mesmo ela passando por processo de regeneração, com o decorrer do tempo a contaminação da DEA atinge valores muito altos provocando sua pouca atividade, necessitando então a troca de inventário. Esse resíduo acumulado pode aderir-se junto aos bocais de carga de resíduo de FCC de forma lenta e contínua, permitindo quebras nas etapas de craqueamento e futura segregação junto aos processos seguintes da unidade.

Assim, com alguns exemplos citados reforça-se o dinamismo da unidade de craqueamento para o não acúmulo de estoques de produtos que não têm mais valia, ou necessitam de alguma adequação para poderem ir ao mercado consumidor. Fortalecendo sua importância no processo de refino, pois além de ter bons produtos na produção, vindo em especial de óleos pesados (baixo valor agregado), otimiza, mitiga e processa resíduos variados decorrentes de toda planta local em várias etapas do processo, não apenas a partir dos bocais de carga.

4.4 APROVEITAMENTOS ENERGÉTICOS

Em plantas de refino a necessidade de uso de utilidades é em grande escala, tanto nos quesitos vapor, como eletricidade e unidades de tratamento de água e esgoto industrial. O FCC é uma unidade com grande contribuição energética para a planta num todo, principalmente na área térmica, o que reforça também sua importância no quesito meio ambiente (produção de energia geralmente impacta meio ambiente) e ajustes da planta para geração versus consumo ficar no empate e assim evitar desperdícios ou carência de alguma corrente de utilidade.

Conforme já citado no item 4.2, as reações de craqueamento ocorrem acima de 500°C, o que dá uma carga térmica alta para os hidrocarbonetos que irão compor a carga para a fracionadora principal, etapa seguinte do processo. Devido as elevadas temperaturas que a carga chega no processo de fracionamento, quase todo esse ganho térmico é aproveitado dentro da unidade. Exemplificando:

- o sistema de fundo da torre fracionadora principal, tem seu controle de temperatura com a carga da unidade, pré-aquecendo a mesma de forma significativa na bateria de pré-aquecimento da carga, economizando a necessidade de fornos de aquecimento. Em paralelo tem um controle fino de temperatura com refervedores de fundo (trocadores de calor) que utilizam água de caldeira como produto frio, gerando assim vapor de média e contribuindo para o inventário de consumo da refinaria.

- os sistemas intermediários da torre fracionadora principal, são utilizados em circulação interna para aquecerem os refervedores de fundo de torres do processo que necessitam de controle de temperatura de fundo para assim manter retificação e enquadramento de produtos, como deetanizadoras e debutanizadoras e também ajudam pré-aquecendo a carga na bateria de pré-aquecimento, que junto com a corrente de fundo consegue próximo de 80% do aquecimento da necessidade de aquecimento antes da corrente adentrar aos bocais de carga.

- o sistema de regeneração do catalisador utilizado no processo para queima de coque, emana gases em alta temperatura e vazão rumo a atmosfera, como CO e CO₂, a inércia desses gases permitem a geração de energia elétrica através de turbo-expansores, complementando a energia interna consumida na planta de forma significativa.

- em paralelo, na regeneração, os sistemas que focam em queima incompleta, tem além do CO que pode ser oxidado a CO₂, a grande temperatura do gás que favorece a reação, e a grande vazão, tudo inerente do processo, permitindo que o gás CO seja

queimado em caldeiras de CO, gerando assim vapor de alta e geralmente sendo o principal alimentador de vapor de alta pressão da planta como um todo.

– ainda na regeneração, o suprir do comburente se dá via grandes máquinas, que são comuns em sistemas de FCC, grandes sopradores para o caso, e grandes compressores para a etapa de recuperação de gases. Devido o porte das máquinas, é comum as turbinas, máquinas motoras que são alimentadas por vapores de alta, vir a ter a possibilidade de ter condensação total, ou condensação parcial com extração no meio de suas rodas. Caso ocorra processo de extração, o vapor gerado é de média pressão, e vem para compensar variações na rede da refinaria. Em condições de condensação total, todo vapor adere a rede de vapor de baixa. Assim, de forma a buscar o equilíbrio de geração versus consumo, algumas turbinas das grandes máquinas podem ajudar o setor de utilidades.

Notamos que o FCC, além de otimizar seu consumo de energia térmica para seu próprio funcionamento, contribui na geração de vapor de média, vapor de alta e geração de energia elétrica da refinaria, de formas significativas e ajuda no equilíbrio das redes de vapor.

Para justificar e exemplificar em números comparativos, um estudo de caso de craqueamento enfatizará resultados aqui já defendidos.

5 FCC EM RELAÇÃO AO COQUEAMENTO RETARDADO

De forma a somar a defesa da tese, uma comparação entre dois processos fundo de barril, de conversão, pode mostrar que o FCC tem suas particularidades únicas no processo de refino. Assim, alguns pontos comparativos entre FCC e coqueamento retardado serão diretamente detalhados.

Primeiramente, enfatizamos que ambos têm em resumo características semelhantes, pois processam carga pesada e produzem produtos leves em sua maioria. Porém o craqueamento do Coqueamento Retardado é térmico e não catalítico como no FCC, interferindo diretamente no controle de processamento e qualidade dos produtos finais. Segundo Farah (2013), como a carga desse processo é mais pesada que a de FCC, e não é um processo catalítico, as frações obtidas apresentam menores rendimentos e maiores teores de enxofre se comparados aos do FCC e precisam ser estabilizados em processos de hidrotratamento para melhoria das qualidades dos produtos, devido principalmente o elevado teor de diolefinas. Pela afirmação de Farah, o coqueamento retardado é um processo que necessita que seus produtos passem por outras unidades para melhorar qualidade dos produtos, fato que nem sempre ocorre no FCC.

No processo de conversão, o coqueamento retardado além de ter menores rendimentos, produz coque. Este é tão significativo em volume que acabou dando o nome a unidade. É salutar enfatizar que em tempos passados o coque era vendido a preço de carvão mineral, mas hoje em dia, há um grande interesse do mercado em seu consumo, assim, até o coque se tornou bem rentável, mas ainda é um produto secundário se comparado aos produtos nobres, leves, de maior valor agregado.

Tabela 4 – Aplicações comerciais das frações de FCC

Fração	Faixa de destilação (°C)	Principais aplicações comerciais
Gás combustível	Abaixo de -42	Gás combustível; matéria para petroquímica
Gás liquefeito do petróleo	-42 a 0	Combustível doméstico e industrial; obtenção de gasolina de aviação
Nafta de craqueamento	32 a 220	Gasolina
Óleo leve de reciclo	220 a 340	Óleo diesel; óleo combustível
Óleo decantado	340 em diante	Resíduo aromático; obtenção de negro de carbono
Coque	-	Totalmente queimado no regenerador

Fonte: FARAH, 2013

Tabela 5 – Aplicações comerciais das frações de coqueamento retardado

Fração	Faixa de destilação (°C)	Principais aplicações comerciais
Gás combustível	Abaixo de -42	Gás combustível
Gás liquefeito do petróleo	-42 a 0	Gás combustível doméstico e industrial
Nafta de coqueamento	32 a 220	Gasolina – solventes, nafta petroquímico, após hidrotratamento;
Gasóleo leve de coqueamento	220 a 340	Óleo diesel, após hidrotratamento; óleo combustível
Gasóleo pesado de coqueamento	340 em diante	Óleo combustível
Coque	-	Produção de anodos para a produção de alumínio ou de eletrodos para a produção de aço; geração de energia

Fonte: FARAH, 2013

Analisando as tabelas 4 e 5, percebe-se uma certa semelhança nos produtos formados de ambas as unidades, mas algumas diferenças são notórias. A gasolina proveniente da nafta, precisa necessariamente passar pela unidade de hidrotratamento quando original da unidade de coqueamento retardado, já que precisa ser tratada, estabilizada e não tem um bom número de octano, assim como o gasóleo leve que precisa passar pela unidade de hidrotratamento para ser utilizado como diesel. Em paralelo, o gás combustível do FCC pode ser matéria para indústria petroquímica e o GLP do FCC pode ser utilizado para obtenção de gasolina de aviação, particularidades não presentes no coqueamento retardado. O coque que é produzido em grande escala na unidade coqueamento retardado, é totalmente queimado no regenerador do FCC, sendo promissor da produção de gás CO que é utilizado na caldeira de CO como combustível para geração de vapor de alta.

Tabela 3 – Exemplos de rendimentos e de características de frações de FCC

Produtos	Propriedades e rendimentos	Carga gasóleo	Carga resíduo atmosférico
GLP	Rendimento, % volume	20 a 25	16 a 20
	Mercaptanos (mg/kg)	275	300
	Enxofre total (mg/kg)	400	500
Nafta	Rendimento, % volume	50 a 60	45 a 55
	Mercaptanos (mg/kg)	400	600
	Enxofre total (mg/kg)	1300	2000
	Número de octano motor	82 a 85	80 a 82
	Número de octano pesquisa	93 a 95	93 a 95
LCO	Rendimento, % volume	7 a 15	10 a 20
	Enxofre total, % massa	3,0	3,5
OD	Rendimento, % volume	5 a 10	8 a 15
	Enxofre total, % massa	5,0 a 6,0	6,0 a 8,0

Fonte: FARAH, 2013

Tabela 6 – Exemplo de rendimentos e de características de frações de coqueamento retardado

Produtos	Propriedades e rendimentos	Valores
GLP	Rendimento	4 a 7
	Enxofre total, % massa	0,1 a 0,3
Nafta	Rendimento	10 a 16
	Enxofre total, % massa	0,5 a 1,0
Gasóleo leve	Rendimento	12 a 16
	Enxofre total, % massa	1,0 a 2,0
Gasóleo pesado	Rendimento	12 a 16
	Enxofre total, % massa	2,0 a 4,0
Coque	Rendimento	25 a 35
	Enxofre total, % massa	3,5 a 5,0

Fonte: FARAHA, 2013

Analisando as tabelas 3 e 6, nota-se que os rendimentos são diferentes em valores relevantes. Temos aproximadamente apenas 5% em média de produção de GLP no coqueamento retardado contra 25% no FCC, em torno de 13% de nafta no coqueamento retardado contra 50% no FCC, e rendimentos semelhantes do gasóleo leve utilizado para produção de diesel no coqueamento retardado, em torno de 15%, se comparado com o LCO do FCC, e uma geração de aproximadamente 25% de coque no coqueamento retardado, que somado ao gasóleo pesado da aproximadamente 40% dos produtos finais. Se comparado com o FCC, é 30% a mais de produtos pesados, já que apenas em torno de 10% do produto final do FCC é utilizado em óleo combustível com o derivado OCC como produto pesado.

Assim, se pode concluir que do ponto de vista de produtos e rendimentos, o processo de coqueamento retardado permite a produção de produtos mais rentáveis, mas em menor qualidade e quantidade se comparado ao FCC quando se analisa um todo.

Do ponto de vista de investimentos temos, conforme a tabela 7 que avalia um investimento relativo, que o coqueamento retardado em relação ao FCC é em torno de 50 a 100% mais caro, sendo então necessário mais capital para um novo empreendimento. Com todos pontos citados, reforça-se a tese que o FCC se mostra uma unidade atrativa para quando se busca unidades fundo de barril.

Pode se observar que a tabela 7 também mostra que em geral os processos de fundo de barril são mais caros no quesito empreendimentos, o que se justifica pela complexidade

das plantas para se otimizar e buscar processos de conversão que normalmente são de alto grau de severidade.

Tabela 7 – Comparação entre o investimento de diversas unidades de refino

Unidade de processo	Investimento relativo*
Destilação atmosférica	1,0
Coqueamento retardado	4,0 a 5,2
UFCC	2,5 a 4,0
HCC de gasóleo	4,5 a 7,4
Reforma catalítica	1,2 a 1,7
Alquilação catalítica	2,2

*Dados básicos: unidade de referência – destilação atmosférica; capacidades: 10 000 m³/d; cálculo feito com base em publicação do *Oil and Gas Journal*.^[6]

Fonte: NILO INDIO, 2014

6 ESTUDO DE CASO

A efeito de conhecimento comparativo e em busca de resultados práticos, analisou-se uma unidade de FCC de forma a sustentar cada argumento de sua importância em uma planta de refino. Mas devido a Lei Geral de Proteção de Dados o estudo vem em caráter relativo, corroborando com os percentuais citados no trabalho, da literatura, sem expor valores absolutos da unidade acompanhada.

Dentro da refinaria, a unidade de FCC analisada, tem como carga nominal uma capacidade de processamento de aproximadamente um terço da carga da planta local, que seria a carga da unidade de destilação, porta de entrada das refinarias. Isso já mostra o quão significativo uma unidade de craqueamento pode ser no quesito percentual de processamento relativo da planta.

Junto com as outras unidades de fundo de barril, a carga processada chega a mais da metade da carga da unidade de destilação, aproximadamente 55%, ou seja, o percentual de óleos pesados na carga de entrada é muito significativo, mostrando o quão importante os processos de fundo de barril são para o processo num todo.

Como a tendência mundial é se ter cada vez mais petróleo mais pesado e com mais contaminantes, a viabilidade e importância das unidades de fundo de barril se tornam necessárias para garantir os produtos esperados pela demanda de mercado.

Analisando uma média mensal, de forma comparativa, tivemos:

- Em relação a carga total, aproximadamente um terço em volume do processado na destilação (carga da refinaria), em relação a composição da carga da unidade, aproximadamente 3% do total como processamento de resíduos.

- Em relação a conversão da carga, média de 80% nos produtos finais, considerando que as correntes de LCO e OD se enquadrariam em sua maioria nos óleos pouco craqueados.

- Em relação ao percentual dos produtos gerados, o gás combustível (GC) ficou com aproximadamente 2%, gás liquefeito de petróleo (GLP) com aproximadamente 25%, nafta craqueada com aproximadamente 53%, óleo leve de diluição (LCO) com aproximadamente 11%, óleo decantado (OD) com aproximadamente 9%.

- Em relação ao percentual de geração na caldeira de CO, com quase todo seu combustível proveniente do processo de regeneração do catalisador do FCC, o gás CO, aproximadamente 30% de todo vapor de alta consumido na refinaria foi gerado pela mesma.

– Em relação ao percentual de geração de energia elétrica no turbo-expansor movido pelos gases CO e CO₂ gerados no processo de regeneração de catalisador do FCC, aproximadamente 15% de toda energia elétrica consumida na refinaria foi gerado pelo mesmo.

– Em relação a geração de vapor de média e extração de grandes máquinas, o foco é mais ajudar nos controles térmicos de geração versus consumo das redes de vapor da refinaria. Apesar de ser difícil contabilizar um percentual, o objetivo principal se cumpriu em boa prática, e indiretamente, parte do percentual consumido de vapor de média foi gerado com planejamento e demanda por equipamentos do processo de FCC.

– Em relação ao processamento de derivados químicos de processos de tratamento, foram processados aproximadamente 150 mil litros de DEA gasta (dietanolamina) e 50 mil litros de dissulfeto líquido.

– Em relação ao reprocessamento de GLP externo, foram reprocessados o equivalente a aproximadamente um sexto da produção de GLP da unidade de FCC.

Os números citados mostram que os percentuais do estudo de caso condizem com a literatura. A princípio os números não são tão chamativos quando se olha valores relativos, mas é importante lembrarmos que refinarias não trabalham com pouca carga, geralmente suas cargas nominais são milhões de litros por dia processados, e em muitos casos, a maioria deles, dezenas de milhões por dia. Logo, 1% em uma carga de 10 milhões de litros significa 100 mil litros ao fim do dia. Assim toda relevância deve ser dimensionada pensando na prática, que para refino trabalham em grande escala de consumo de utilidades, e geração de produtos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma discussão sobre a importância do Craqueamento Catalítico Fluidizado dentro de uma planta de refino baseado em pesquisa bibliográfica e experiência de trabalho no ramo.

O segundo capítulo enfatizou um pouco do petróleo, o que é e seus usos em geral. Foi apresentado um pouco do panorama de sua evolução, justificando então sua grande importância para os dias de hoje. E mostrou qual a situação atual do Brasil no quesito refino, enfatizando quais produtos acabados ainda estão presentes em déficits, que são dois dos principais produtos produzidos pelo FCC. E pelos números citados mostrou-se a tamanha importância do refino no dia a dia, ao qual o craqueamento catalítico fluidizado faz parte.

No terceiro capítulo com detalhes de processos, verifica-se que o refino não é um processo simples, pois apresenta vários tipos de tecnologias de tratamento, conversão e separação de fases. Mesmo com alguns desses processos escritos de forma simplificada e com suas correlações em produtos e etapas, com citações de importância e pontos críticos, o FCC se destaca em grau de complexidade, mas não deixa de entregar produtos de alta qualidade e de grande valor agregado com ótimo controle do processo.

No quarto capítulo, foi dado ao processo de craqueamento catalítico fluidizado maior ênfase de detalhes buscando justificar a tese defendida no trabalho e a conclusão dos objetivos esperados. Argumentos com bases numéricas comparativas, foram debatidos e detalhados de forma a mostrar a realidade prática da unidade com detalhes sobre conversão de carga de baixo valor agregado a produtos de alto valor agregado por processo físico-químico, mostrando o percentual dos produtos gerados e assim a importância da unidade no quesito lucro. Foi mostrado que o dinamismo da unidade para processamento e reprocessamento de resíduos e gases, produtos químicos já saturados usados em processos de tratamento contribuem com o meio ambiente, e para o equilíbrio da logística e programação de produção da refinaria. Além da contribuição térmica e elétrica, que é significativa em valores absolutos na planta de refino como um todo. Destacando por exemplo a geração de vapor de alta com combustível gerado na unidade de FCC suprimindo em média 30% de todo consumo da planta no estudo de caso citado.

No quinto capítulo, mostrou-se uma comparação entre dois processos fundo de barril, o FCC e o coqueamento retardado. As semelhanças dos objetivos de cada processo permitiram tal confronto, e deixou claro as vantagens do FCC em relação a unidade de

coqueamento retardado, justificado pelos números apresentados, como melhores rendimentos, produtos de melhor qualidade e menor custo relativo de novos empreendimentos, apoiando a tese do trabalho que busca mostrar a importância do FCC em plantas de refino.

No sexto capítulo, estudo de caso, verificou-se que os percentuais citados na literatura de conversões da carga em produtos estavam corretos, mostrando que os produtos finais são rentáveis, justificados pelo consumo em grande escala e bons valores agregados, conforme esperado como objetivo do trabalho. Com detalhes específicos, justificou-se todo dinamismo da unidade, citando por exemplo os percentuais comparativos de geração de vapor de alta e energia elétrica em relação a refinaria como um todo. Logo o potencial relevante da unidade no balanço energético em uma planta de refino foi confirmado em valores práticos. Com relação ao processamento e reprocessamento de resíduos, os percentuais citados mostraram a relevância da unidade, pois em processo de grande escala, caso de refinarias, o desenvolvimento sustentável faz parte da bandeira atual mundial, justificando investimentos e continuidade operacional.

Portanto, com tudo que foi apresentado é possível concluir que o craqueamento catalítico fluidizado é uma unidade versátil na ajuda do controle e geração de utilidades, no processamento e reprocessamento de resíduos de forma mais efetiva e barata, e na produção em grande escala de produtos desejáveis, ajudando no processo econômico, logístico, ecológico e de equilíbrio de processo de refino, que tem sua grande importância na atualidade.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. **Polietileno**. Equipe Brasil Escola, 2024. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/polietileno.htm>. Acesso em 11 out. 2024.
- COMBULUZ. **Histórico da produção de petróleo no mundo**. Disponível em: <https://www.combuluz.com.br/historico-da-producao-de-petroleo-no-mundo/>. Acesso em: 11 out. 2024.
- FÁBRICA CARIOCA DE CATALISADORES. **A importância dos elementos Terras Raras para os catalisadores de craqueamento**. Disponível em: <https://www.fccsa.com.br/pt/fcc-connect/todas-publicacoes/importancia-dos-elementos-terras-raras-para-os-cat>. Acesso em: 11 out. 2024.
- FARAH, M. A. **Petróleo e seus derivados: definição, constituição, aplicações, especificações, características de qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- FERNANDES, J. L.; PINHEIRO, C. I. C.; OLIVEIRA, N.; RIBEIRO, F. R. **Modeling and simulation of an operating industrial fluidized catalytic cracking (FCC) Riser**. Disponível em: https://www.academia.edu/18159822/Modeling_and_Simulation_of_an_Operating_Industrial_Fluidized_Catalytic_Cracking_FCC_Riser. Acesso em: 16 jul. 2023.
- IN-SU HAN; RIGGS, J. B.; CHUNG, C.B. Modeling and optimization of a fluidized catalytic cracking process under full and partial combustion modes. **Chemical Engineering and Processing: process intensification**, v. 43, n. 8, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S025527010400008X>. Acesso em 16 jul. 2023.
- JOHN, Y.M.; PATEL, R.; MUJTABA, I.M. Maximization of gasoline in an industrial FCC unit. **Energy and Fuels**. Energy and fuels, v. 31, n. 5, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00071>. Acesso em: 16 jul. 2023.
- MARTINS, M. A. F.; ZANIN, A.C.; ODLOAK, D. Robust model predictive control of an industrial partial combustion fluidized-bed catalytic cracking converter. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 5, p. 917-930, may 2013.
- MATERIAL PROPERTIES. **Polietileno**. Disponível em: <https://material-properties.org/pt-br/polietileno/>. Acesso em: 11 out. 2024.
- MATERIAL PROPERTIES. **Polipropileno**. Disponível em: <s://material-properties.org/pt-br/polipropileno/>. Acesso em: 11 out. 2024.
- PETROBRAS FOTO WEB. **Acervo de imagens e da marca Petrobras**. Disponível em: <https://bancodeimagens.petrobras.com.br/fotoweb/>. Acesso em: 11 out. 2024.
- QUELHAS, A. D. **Processamento de petróleo e gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

REVISTA PLÁSTICO MODERNO. **Polipropileno**: entenda tudo sobre este material! o que é? para que serve? quais os tipos de polipropileno. Disponível em: <https://www.plastico.com.br/polipropileno-entenda-tudo-sobre-este-material-o-que-e-para-que-serve-quais-os-tipos-de-polipropileno/>. Acesso em: 11 out. 2024.

VEJA NEGÓCIOS. **Consumo de petróleo seguirá muito elevado por mais de 40 anos, segundo IBP**. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/coluna/radar-economico/consumo-de-petroleo-seguira-muito-elevado-por-mais-de-40-anos-segundo-ibp>. Acesso em: 11 out. 2024.

VERSIGNASSI, A. Brasil, o mega exportador de petróleo que precisa importar combustível. **Invest News**. Disponível em: <https://investnews.com.br/economia/brasil-o-mega-exportador-de-petroleo-que-precisa-importar-combustivel/>. Acesso em: 11 out. 2024.