

Aumento da Rentabilidade na Produção de Propileno e Derivados numa Refinaria

Galp Energia

Maria Margarida de Almeida Cardoso de Menezes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão Industrial

Orientadores: Professor Doutor Henrique Aníbal Santos de Matos
Eng.^a Ana Rita Oliveira

Júri

Presidente: Professor Doutor Miguel Torres Preto
Orientador: Professor Doutor Henrique Aníbal Santos de Matos
Arguente: Professora Doutora Maria Filipa Gomes Ribeiro

Novembro, 2021

DECLARAÇÃO

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Professor Henrique Aníbal Santos de Matos pelo acompanhamento, pela orientação e apoio ao longo do desenvolvimento desta tese de mestrado, e por todas as correções e propostas de melhoria, quando necessárias.

À Eng. Rita Oliveira, pelo acompanhamento incansável durante o meu estágio na Galp Energia, por partilhar e disponibilizar a informação necessária para a realização deste trabalho e pelo apoio e disponibilidade demonstrados durante o meu percurso.

Ao Eng. Gonçalo Caeiro e Pedro Oliveira, pela oportunidade de desenvolver este estágio e por me terem acolhido tão bem nas suas equipas de trabalho, embora que numa situação atípica de pandemia.

Por fim, devo agradecer à minha família, amigos e ao Pedro, pelo apoio incondicional, pela paciência, pelo encorajamento nos momentos em que o fim deste trabalho parecia distante e por acreditarem sempre em mim.

RESUMO

O desafio global de descarbonização da sociedade obriga as atividades económicas a uma revisão profunda dos seus processos. A Galp pretende transformar a sua refinaria de Sines num *green energy hub* até 2030, através da implementação de iniciativas de eficiência energética e projetos para redução da sua pegada carbónica.

Atualmente, na unidade FCC da refinaria de Sines o propileno é um subproduto que apresenta grande potencial de valorização e uma projeção crescente da procura, com taxas de crescimento anuais de 6% a nível mundial. Aliado à necessidade de reduzir a produção de combustíveis poluentes, este crescimento representa uma oportunidade para o negócio.

O desafio proposto neste trabalho baseia-se em avaliar a possibilidade de aumentar o rendimento em propileno na unidade FCC através de pequenas mudanças no seu processo de produção, como o aumento da temperatura de reação e ajustes no catalisador, nomeadamente na incorporação de aditivo. Por outro lado, pretende-se aumentar a valorização deste propileno, através de um investimento num *splitter*, que permita a obtenção de um produto de elevada pureza (propileno *polymer-grade*).

Ao longo do projeto será apresentada a contextualização do problema, seguida de uma revisão de literatura. Serão analisadas diferentes tecnologias e possíveis alterações a aplicar no FCC para atingir os objetivos propostos. De acordo com vários cenários de preços futuros, será feita uma avaliação económica de forma a verificar que os investimentos necessários serão compensados no futuro e que este é o rumo certo a seguir.

Palavras-Chave: Descarbonização; Galp; Unidade FCC; Propileno; *Polymer-grade*

ABSTRACT

The global challenge of decarbonization of society forces all economic activities to a thorough review of their processes. The Galp group intends to transform its Sines refinery into a green energy hub by 2030, by implementing energy efficiency initiatives and projects to reduce its carbon footprint.

Currently, in the FCC unit of its refinery at Sines, propylene is a by-product that presents a great potential for valorization and a growing projection of demand, with annual growth rates of 6% globally. Combined with the need to reduce the production of polluting fuels, this growth represents an opportunity for the company.

The challenge proposed in this work is based on evaluating the possibility of increasing propylene yield in the FCC unit, through small changes in its production process, such as increasing the reaction temperature and adjusting the catalyst, namely in the incorporation of additive. On the other hand, it is intended to increase the valorization of this propylene, through an investment in a splitter, which allows obtaining a product of high purity (propylene polymer-grade).

Throughout the project, the contextualization of the problem will be presented, followed by a literature review. Different technologies and possible changes to be applied in the FCC to achieve the proposed objectives will be analyzed. According to several future price scenarios, an economic evaluation will be performed in order to verify that the necessary investments will pay off in the future and this is the right way to go.

Keywords: Decarbonization; Galp; FCC unit; Propylene; Polymer-grade

ÍNDICE

ÍNDICE.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xv
LISTA DE SIGLAS.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	4
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	5
2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	7
2.1 ANÁLISE DE CASO – GALP ENERGIA.....	7
2.1.1 História.....	7
2.1.2 Grupo Galp	7
2.1.3 Refinação em Portugal	8
2.1.3.1 Refinaria de Sines	8
2.1.3.1.1 Fábrica I	9
2.1.3.1.2 Fábrica II	9
2.1.3.1.3 Fábrica III	10
2.1.3.1.4 Fábrica de Utilidades	11
2.1.3.1.5 Central de Cogeração	11
2.1.3.2 UNIDADE FCC – Craqueamento Catalítico em Leite Fluidizado.....	11
2.1.3.2.1 Descrição Geral do Processo	12
2.2 OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS	14
2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1 TIPOS DE <i>CRUDE</i>	17
3.2 ETAPAS DA REFINAÇÃO.....	18
3.3 PROPILENO	19
3.3.1 Procura por Região	19
3.3.2 Polipropileno	20
3.3.2.1 Evolução da Procura	21
3.4 MAXIMIZAÇÃO DE PROPILENO NO FCC	22
3.4.1 Sistema Catalítico.....	23
3.4.1.1 Catalisador.....	23
3.4.1.2 Aditivo	23
3.4.1.3 Aditivos no Mercado	25
3.4.1.3.1 BASF	25
3.4.1.3.2 GRACE	26

3.4.1.3.3	JOHNSON MATTHEY	26
3.4.2	Temperatura	27
3.4.3	Tecnologia	27
3.4.4	Casos de Estudo	28
3.4.4.1	Experiência numa empresa na Eslováquia	28
3.4.4.2	Experiência numa empresa no Brasil	29
3.4.5	Limitações.....	30
3.5	PROPILENO POLYMER-GRADE	30
3.5.1	<i>Splitter</i> de C ₃	31
3.5.2	Fornecedores de <i>Splitters</i> de C ₃	33
3.5.3	Estudo de Caso	34
3.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	35
4	CENÁRIO ATUAL: CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE.....	37
4.1	RENDIMENTO EM PROPILENO	37
4.2	PROPILENO POLYMER-GRADE	38
4.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	40
5	SIMULAÇÃO DA UNIDADE FCC	41
5.1	CENÁRIOS DE PREÇOS	42
5.2	ANÁLISE DE PREÇOS: Propileno VS Gasolina	44
5.3	MARGENS DE REFINAÇÃO.....	45
5.4	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	48
6	AVALIAÇÃO ECONÓMICA	49
6.1	ESTIMATIVA DO CAPEX PARA MAXI-PROPILENO NO FCC	49
6.1.1	Tempo de Retorno do Investimento	50
6.2	PROPILENO POLYMER-GRADE	51
6.2.1	Tempo de Retorno do Investimento em Propileno <i>Polymer-Grade</i>	52
6.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	53
7	CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	55
	REFERÊNCIAS.....	57
	ANEXOS.....	61
	ANEXO 1 – ESQUEMA DA REFINARIA DE SINES	61
	ANEXO 2 – CATEGORIZAÇÃO DE PETRÓLEO.....	63
	ANEXO 3 – COLUNA DE DESTILAÇÃO.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Contribuição setorial para a trajetória de redução de emissões de GEE até 2050.....	1
Figura 2 - Frota europeia de veículos de passageiros.....	2
Figura 3 – Produção total das refinarias em 2020.	3
Figura 4 - Esquema com a estrutura do documento.....	5
Figura 5 – Esquema simplificado do FCC licenciado pela UOP.....	12
Figura 6 - Origem geográfica dos crudes usados pela Galp, em 2018.	17
Figura 7 - Utilizações finais de propileno.	19
Figura 8 - Consumo global de propileno em 2019.	20
Figura 9 - Distribuição das diferentes utilizações de Polipropileno.....	20
Figura 10 - Tamanho de mercado do PP por região.....	21
Figura 11 – Projeção dos rendimentos de propileno em função da gasolina, numa unidade FCC.....	22
Figura 12 - Rendimento em propileno em função da concentração de aditivo, em percentagem mássica.....	28
Figura 13 - Variação no rendimento de propileno em função do teor de ZSM-5, a 545°C e a 560°C..	29
Figura 14 – Diagrama de um Splitter de C ₃ com bomba de calor, à pressão da torre de mais de 125 psig.	31
Figura 15 - Avaliação projeto da torre do Splitter, para um processo de separação de 6000 b/d de C ₃	32
Figura 16 - Esquema de fluxo de processo da PRU da UOP.....	33
Figura 17 - Comportamento dos rendimentos em propileno em função da adição de ZSM-5.....	37
Figura 18 – Comportamento dos rendimentos em propileno em função do aumento de temperatura.	38
Figura 19 - Valorização de propileno polymer-grade e refinery-grade.	39
Figura 20 – Fluxograma do processo de produção de propileno, a partir do FCC.....	39
Figura 21 - Possíveis cenários de preços futuros da Galp.....	42
Figura 22 - Evolução da procura de transporte rodoviário da EU, em mtoe, até 2040, por cenário	43
Figura 23 - Preços do Brent a longo prazo, por cenário.....	44
Figura 24 – Correlação Margem PL vs Preço Exp. Propileno – GA Cracking.....	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Preços do Propileno e Gasolina para os diferentes cenários	44
Tabela 2 - Margens de Refinação de Propileno em M\$/y, obtidas pelo PL	45
Tabela 3 - Condições Operatórias da Unidade FCC para maxi-propileno	46
Tabela 4 - Delta Rendimentos para o Maxi-Propileno	47
Tabela 5 – Valorização das margens de propileno para cada cenário, com utilização do splitter	51

LISTA DE SIGLAS

bpd – Barris por dia

bbl – barril de *crude*

BOB - Before Oxigenate Blending

C₃= – Propileno

CAGR – Compound Annual Growth Rate (Taxa de Crescimento Anual Composta)

CapEx - *Capital expenditures*

CG – Chemical-Grade

CO – Monóxido de Carbono

FCC – Fluid Catalitic Cracking (Unidade de Cracking Catalítico em Leito Fluidizado)

GEE – Gases de Efeito Estufa

GPL – Gás de Petróleo Liquefeito

HCO – Heavy Cycle Oil

HVGO – Heavy Vacuum Gas Oil (Gasóleo de Vácuo Pesado)

LCO – Light Cycle Oil (Gasóleo Leve)

LVGO – Light Vacuum Gas Oil (Gasóleo de Vácuo Leve)

NO_x– Óxidos de Nitrogénio

PG – Polymer-Grade

PP - Polipropileno

PRU – Propylene Recovery Unit (Unidade de Recuperação de Propileno)

RAT – Resíduo Atmosférico

RG – Refinery-Grade

RV – Resíduo de Vácuo

RVB – Resíduo de *Visbreaker*

SO_x– Óxidos de Enxofre

toe – Tonne of Oil Equivalent (Tonelada Equivalente de Petróleo)

VGO – Vacuum Gas Oil (Gasóleo de Vácuo)

VE – Veículos Elétricos

wt% – Percentagem em Peso

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é introduzido o problema em estudo e a sua contextualização e motivação. São definidos os objetivos principais da dissertação, assim como toda a metodologia que irá ser usada ao longo do mesmo. Em forma de conclusão, é apresentada a estrutura do documento.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Um dos grandes desafios nas próximas décadas para a humanidade será o de conciliar prosperidade económica com neutralidade carbónica. O desafio global de descarbonização da sociedade obriga todas as atividades económicas e, em particular, o setor energético, a uma revisão profunda dos seus processos.

O modelo económico atual é baseado na exploração de recursos - extração de combustíveis fósseis, matérias primas, solo e água - que são transformados, usados e depositados de novo no ambiente sob a forma de resíduos ou emissões para a atmosfera. Este modelo linear da economia não é sustentável e está na base da generalidade dos problemas ambientais (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019). Na Figura 1 encontram-se representadas as contribuições, por setor, para a redução de emissões de GEE a nível nacional, projetadas até 2050.

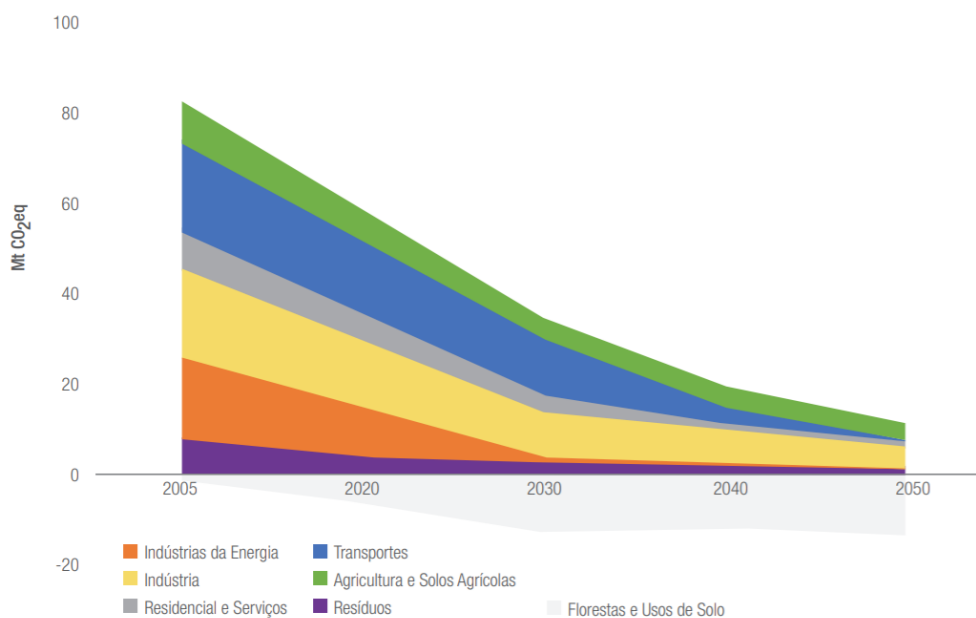


Figura 1 - Contribuição setorial para a trajetória de redução de emissões de GEE até 2050.

Fonte: (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019)

Na indústria as reduções serão menos expressivas quando comparadas com outros setores, mas ainda assim bastante significativas, traduzindo-se num potencial de redução global de emissões de cerca de 73% (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019).

O setor dos transportes, que representa 25% das emissões de GEE a nível nacional, é o maior consumidor de energia de origem petrolífera, contribuindo de modo incontornável para a dependência energética do País. Apesar da inovação tecnológica neste campo, os transportes de pessoas e mercadorias continuam a exercer grandes pressões que se traduzem em impactos negativos sobre o ambiente (Agência Portuguesa do Ambiente, 2020). A descarbonização deste setor até 2050 será quase total, apresentando uma redução de 98% das emissões de GEE face a 2005 e será alicerçada fundamentalmente no reforço do sistema de transporte público e na substituição dos atuais veículos a combustíveis fósseis por uma frota essencialmente elétrica.

A eletrificação de base renovável, transversal a todos os setores de consumo final, irá permitir uma transição relativamente rápida dos atuais veículos com motores de combustão interna para veículos elétricos, com a eletricidade a atingir 70% do consumo energético total dos transportes em 2050 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019).

No transporte ligeiro de passageiros o gasóleo deixa de ser custo-eficaz até 2030 e a gasolina até 2040, sendo em ambos os casos substituídos por veículos elétricos (VE). A eletricidade assegurará mais de 30% da satisfação da procura de mobilidade em 2030, com um potencial de atingir 100% em 2050 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2019). Os veículos elétricos tornam-se uma visão cada vez mais comum nos próximos anos, como se pode observar na Figura 2.

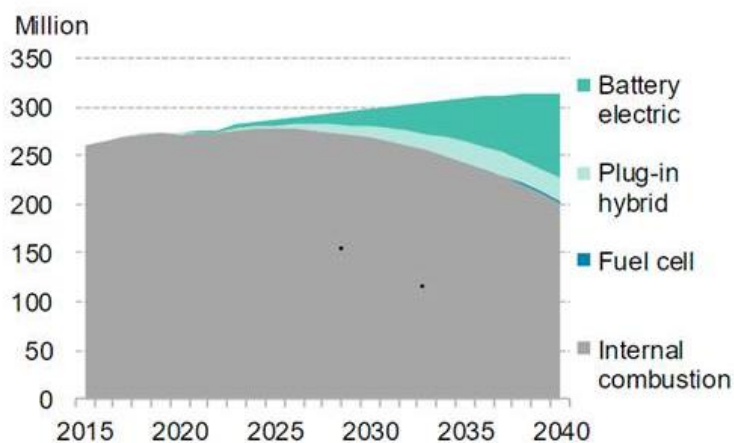


Figura 2 - Frota europeia de veículos de passageiros.

Fonte: (BloombergNEF, 2020)

Como consequência sobretudo da alteração do paradigma na mobilidade, perspectiva-se que o setor da refinação evolua para outras formas de produção como a produção de hidrogénio e outros químicos e, potencialmente, a reconversão para biorefinarias, assistindo-se a uma alteração significativa do sistema

de produção atual. Esta necessidade de descarbonização da economia implica a redução do consumo de combustíveis fósseis, o que provocará uma alteração profunda na indústria e na forma como são produzidos e utilizados os hidrocarbonetos, principais componentes do petróleo.

Algumas das atuais aplicações dos hidrocarbonetos são cruciais para a qualidade de vida da sociedade moderna, como é o caso do setor petroquímico, que produz matérias-primas utilizadas no fabrico de muitos produtos do quotidiano, como roupa, detergentes, aditivos alimentares, medicamentos, eletrodomésticos, entre outros.

A indústria petroquímica é responsável pela transformação de derivados de gás natural e petróleo em matérias-primas com maior valor agregado, que são utilizadas no fabrico de produtos de grande relevância para a sociedade. Este setor tem-se tornado cada vez mais estratégico e importante para a economia.

A principal missão do setor energético deve continuar a ser a otimização da sua atividade, garantindo o abastecimento do mercado através do cumprimento das mais rigorosas práticas ambientais e promovendo, ao longo da cadeia de valor, a minimização do seu potencial impacto negativo, nomeadamente pela promoção de medidas de eficiência energética. (Galp, 2015a).

Assim, devido à previsível redução do consumo de combustíveis fósseis, para garantir a viabilidade das refinarias é necessário aumentar o rendimento em químicos. É aqui que surge o conceito de refinarias *crude-to-chemicals*, onde os químicos são a maioria da produção, sendo os combustíveis líquidos o subproduto. Faz sentido que as refinarias comecem a desinvestir na produção de gasolina e a investir na produção de químicos que apresentem crescimento nos próximos anos, como o propileno, o butileno e o etileno, produtos que são matéria-prima à indústria petroquímica. Na Figura 3 observa-se o perfil de produtos das refinarias portuguesas - do grupo Galp - em 2020, e onde se pode observar que cerca de um quinto foi gasolina.

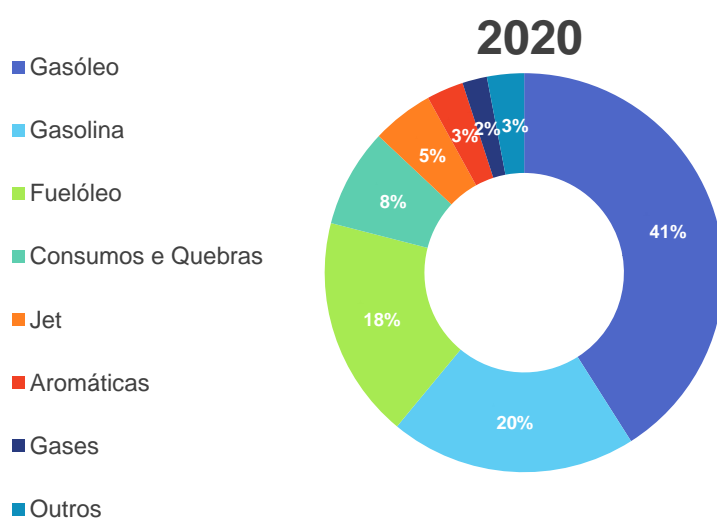


Figura 3 – Produção total das refinarias em 2020.

Dados: (Galp, 2021a)

Para a grande maioria das refinarias de petróleo e produtores químicos, a necessidade de melhorar as margens e permanecer competitiva nunca foi tão grande. A integração das refinarias com produtos químicos está a tornar-se uma importante estratégia de crescimento para muitas empresas. A crescente pressão sobre as refinarias devido à transição energética e o forte crescimento da procura, tanto nos mercados de olefinas como de aromáticos, apoiada pela procura global contínua de produtos plásticos e fibras sintéticas, são fatores chave no esforço de integração (Gupta & Xu, 2019).

Atualmente, em Portugal, a refinação tem já alguma integração com o setor petroquímico. No entanto, existe ainda margem para maximizar a produção de químicos em detrimento da produção de combustíveis fósseis.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal deste trabalho é analisar quais as melhores tecnologias e processos existentes no mercado que permitam capacitar a refinaria de Sines para a maximização da produção de propileno na sua unidade FCC, e posterior produção de propileno *polymer-grade* - propileno com elevado grau de pureza - de forma a criar valor para a empresa.

Assim, o foco desta dissertação irá incidir na unidade FCC da Galp, localizada na sua refinaria, em Sines. Este documento começará por apresentar o grupo Galp, assim como o seu complexo refinador, mais concretamente a refinaria em Sines e os principais processos que a caracterizam.

As principais questões de investigação consistem em avaliar a tendência de mercado para o propileno na Europa e no Mundo, de forma a justificar o investimento na maximização de propileno, assim como avaliar as alterações e investimentos necessários realizar na unidade FCC para os objetivos descritos, validando quais os que se ajustam à capacidade e metas da empresa.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A Figura 4 contém de forma esquemática e visual a estrutura desta dissertação:

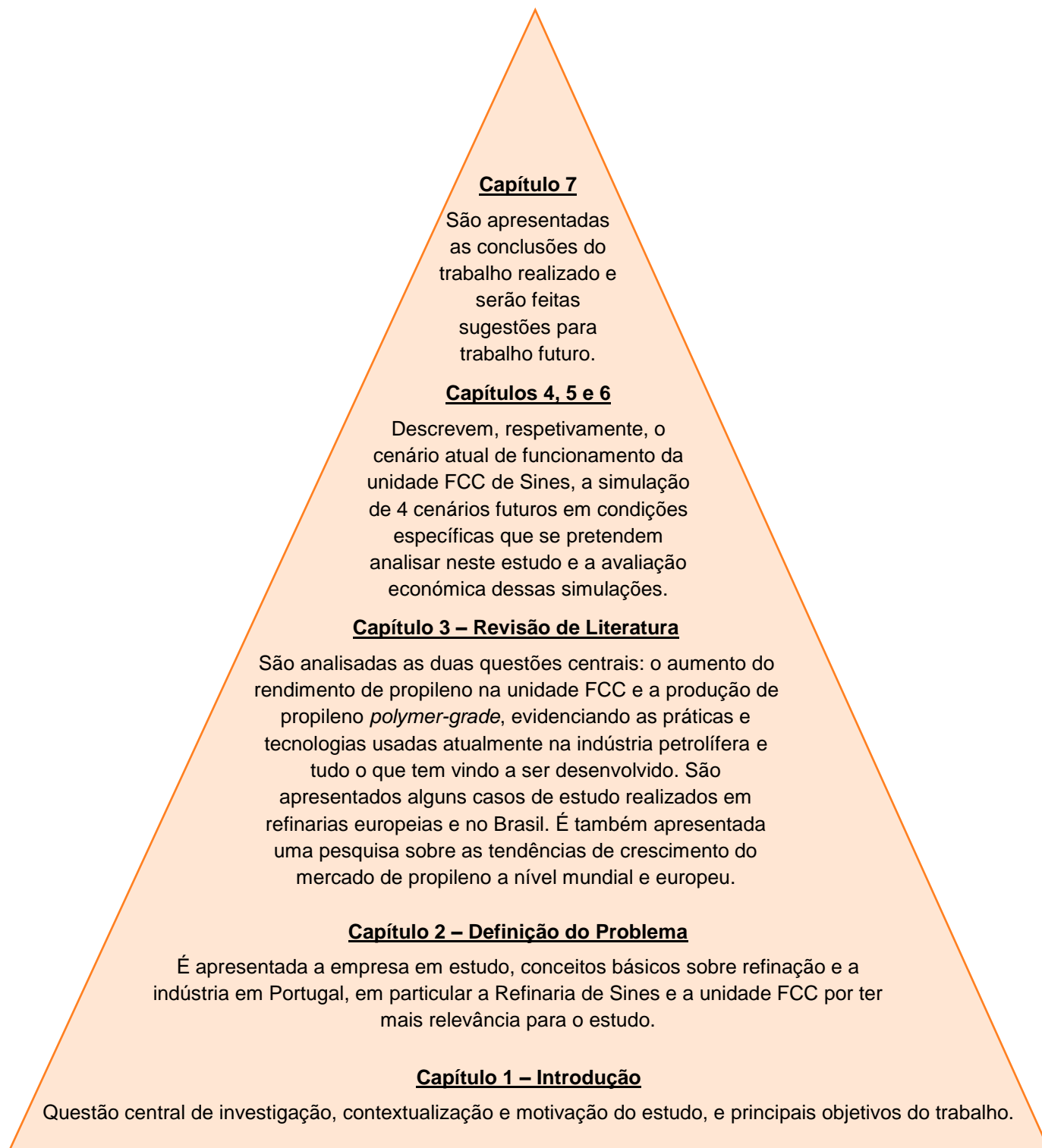


Figura 4 - Esquema com a estrutura do documento

2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Este capítulo contextualiza a empresa onde foi desenvolvido o estudo. São apresentados os processos e unidades presentes na refinaria de Sines e são descritas as oportunidades identificadas, definindo o problema em causa. Na última secção serão apresentadas conclusões.

2.1 ANÁLISE DE CASO – GALP ENERGIA

2.1.1 História

A história da Galp percorre três séculos e está amplamente associada à evolução industrial de Portugal. O negócio do petróleo em Portugal começou em 1896, com a criação da *Vacuum Oil Company*. Até ao final dos anos 30 do século XX, o abastecimento de produtos petrolíferos em Portugal era realizado por várias empresas estrangeiras como a *Shell*, a *Vacuum* e a *Atlantic*. Em 1933, foi constituída a Sociedade Nacional de Petróleos (SONAP), detida em 40% pelo Estado português, mas que em nada mudou o panorama nacional do mercado de combustíveis. Em 1937, é fundada a Sociedade Anónima de Combustíveis e Óleos Refinados (SACOR), que passou a ser a primeira empresa petrolífera portuguesa a dominar todo o processo, desde a importação, transporte, refinação e distribuição de produtos petrolíferos. A SACOR escolheu Cabo Ruivo, zona oriental de Lisboa tradicionalmente industrial, para instalar a primeira refinaria portuguesa, inaugurada em 1947. Devido à 2ª Guerra Mundial e às limitações ao transporte e exportação por via marítima, a refinaria nunca atingiu o seu potencial de refinação de 300 mil toneladas ao ano. Em 1976 foi constituída a Petrogal, a partir de quatro empresas portuguesas - SACOR, CIDLA, SONAP, e PETROSUL - que foram nacionalizadas na sequência da revolução de abril de 1974. A Petrogal em conjunto com a Gás de Portugal e a Transgás foram transformadas em sociedades anónimas e foi composta uma sociedade de gestão de participações sociais (SGPS) que criou a GALP - Petróleos e Gás de Portugal, para explorar o negócio do petróleo e do gás natural na sequência da reestruturação do setor energético em Portugal. A Galp viria a ser privatizada em 2000 (Castaño, Fonseca, Lains, & Marcos, 2017). Em 2006, a Galp Energia foi cotada na bolsa.

A Galp tornou-se não só a única empresa de refinação e distribuidora líder de produtos petrolíferos em Portugal, mas também a maior importadora e distribuidora de gás natural a nível nacional.

2.1.2 Grupo Galp

A Galp posiciona-se como uma empresa integrada de energia que desenvolve negócios rentáveis e sustentáveis, com o objetivo de criar valor para os seus *stakeholders* (Galp, 2020b), e destaca-se pela elevada complexidade e competitividade no setor europeu (Galp, 2020a). Recentemente, a Galp Energia, SGPS, S.A. sofreu uma reestruturação da sua organização, passando a contemplar quatro áreas de negócio, que vieram substituir os três existentes anteriormente. São elas o *upstream* (exploração e produção de petróleo e gás natural); *Industrial & Energy Management* (o primeiro inclui

as atividades de refinação, cogeração e logística no segmento Industrial, enquanto o segundo compreende os negócios de aprovisionamento e *trading* de produtos petrolíferos, de gás e eletricidade); uma unidade comercial (oferta integrada de produtos petrolíferos, gás, eletricidade e serviços, dos segmentos B2B e B2C) e por fim, renováveis e novos negócios (Galp, 2021a).

O Grupo Galp é constituído pela Galp e suas subsidiárias, as quais incluem a Galp Energia E&P BV, a Petróleos de Portugal – Petrogal, S. A., a Galp Gas & Power SGPS, S.A., e a Galp Energia, S.A, entre outras. Os resultados das empresas do Grupo são consolidados nos resultados da empresa-mãe, a Galp Energia, SGPS, S.A. (Galp, 2020c).

Esta organização foi, durante mais de meio século, detentora de um sistema refinador integrado constituído por duas refinarias em Portugal, localizadas em Matosinhos e em Sines, com capacidade de processamento de *crude* que rondava os 330 mil barris por dia. Em março de 2021, no seguimento da atualização da sua estratégia, a empresa concentrou as operações de refinação no complexo de Sines, descontinuando a refinaria de Matosinhos.

2.1.3 Refinação em Portugal

No mercado petrolífero existem várias participações, públicas e privadas, de diversas dimensões e que dominam, total ou parcialmente, a atividade petrolífera – *upstream* (exploração e produção) e *downstream* (refinação e processamento).

O petróleo bruto, ou *crude*, não processado é composto por diversos hidrocarbonetos com propriedades físico-químicas diferentes, e tem pouca utilidade prática. É numa refinaria que se realiza o processo químico de limpeza e refinação do petróleo bruto extraído dos poços e minas, produzindo diversos derivados do petróleo, como lubrificantes, asfalto, coque, diesel, gasolina, nafta, GPL e outros.

O aparelho refinador português, que até 2021 foi constituído pelas refinarias de Sines e de Matosinhos, assegurava cerca de 88% das necessidades de combustíveis petrolíferos do País. Ao nível da Península Ibérica, as duas refinarias representavam cerca de 20% da capacidade de refinação com uma capacidade de destilação anual de 14,5 milhões de toneladas (Freitas, 2019).

2.1.3.1 Refinaria de Sines

A refinaria de Sines é um ativo da Petrogal, SA, empresa do Grupo Galp Energia, e iniciou a sua laboração em 1978, tendo sofrido várias evoluções ao longo dos anos. É uma das maiores da Europa, e a principal (e agora única) refinaria em Portugal, com capacidade atual de destilação de cerca de 10 milhões de toneladas de *crude* ao ano. A sua localização costeira e as infraestruturas portuárias de Sines são privilegiadas, tanto para o aprovisionamento de *crude* como para a exportação de produtos (Galp, 2020a). Possui uma configuração processual orientada para a maximização da produção de gasolinas e gasóleos, dispondo de unidades de conversão catalítica de destilados pesados - unidade

de *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) e *Hydrocracking* (HCK), respetivamente. Esta aptidão processual permite reduzir a produção de fuelóleo e, conseqüentemente, acrescentar valor à produção de produtos refinados por tonelada de petróleo bruto tratada.

Ocupa uma área de 320 hectares e possui uma capacidade de armazenagem de 3 milhões de metros cúbicos, dos quais metade são de petróleo bruto e o restante de produtos intermédios e finais, como o gás, a gasolina e o gasóleo (Galp, 2020a). A refinaria compreende 34 unidades processuais, divididas pelas seguintes instalações: fábrica I, fábrica II, fábrica III, fábrica de utilidades, central de cogeração, e outras unidades como a chaminé da refinaria de Sines e as salas de controlo. Estas três fábricas relacionam-se com as fases evolutivas da refinaria de Sines, onde a fábrica I corresponde ao início da sua atividade, em 1980 com características de *hydroskimming*, com a construção da fábrica II em 1990 a refinaria passa a ter uma configuração complexa do tipo *cracking* sendo posteriormente convertida em *hydrocracking* com a inclusão da fábrica III, em 2013 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008). Na Figura A1.1, no Anexo 1, encontra-se esquematizado o complexo refinador de Sines, com as respetivas unidades processuais que o constituem.

Nesta secção a fábrica II será exposta mais detalhadamente, uma vez que o objeto de estudo deste trabalho é a unidade FCC pertencente a esta zona da refinaria.

2.1.3.1.1 **Fábrica I**

A fábrica I engloba as unidades cuja finalidade é separar o crude em frações - unidades de destilação atmosférica e destilação de vácuo I - bem como as unidades de tratamento destas frações - destacando-se as unidades de merox e hidrotreatamento - e ainda a unidade *steam reforming* de produção de hidrogénio, e a unidade de conversão *platforming*, onde se obtém um componente de gasolinas de elevado índice de octano (reformado). Nesta zona da refinaria produzem-se gases, gasolina, combustíveis de aviação, gasóleo e fuelóleo (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

2.1.3.1.2 **Fábrica II**

A fábrica II inclui as unidades de destilação de vácuo II, de *visbreaker*, uma unidade de *Cracking* Catalítico em Leito Fluidizado (FCC), merox de GPL e unidade de alquilação (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

Destilação de Vácuo II

Esta unidade tem como carga o resíduo atmosférico (RAT) proveniente da destilação atmosférica, obtendo-se como produtos destilados, gasóleo de vácuo (VGO) e resíduo de vácuo (RV). O destilado, depois de dessulfurado, é enviado para a *pool* de gasóleos, o VGO constitui a alimentação do FCC e do *Hydrocracker* e o RV alimenta a unidade de *visbreaker* (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

Visbreaker

O principal objetivo desta unidade é reduzir a viscosidade do resíduo de vácuo proveniente da unidade de vácuo II, através de um processo de *cracking* térmico, obtendo-se resíduo de *visbreaker*, gasóleo, nafta e off-gás. O resíduo de *visbreaker* é utilizado como componente de fuelóleo, o gasóleo depois de dessulfurado é enviado para a *pool* de gasóleos, a nafta é alimentada ao FCC e o off-gas é enviado para a unidade de concentração de gases do FCC (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

Unidade FCC - Fluid Catalytic Cracking

Por ser a unidade onde se vai centrar este estudo, será apresentada em maior detalhe na Secção 2.1.3.2.

Merox de GPL

Os derivados de petróleo têm mercaptanos na sua constituição que afetam a qualidade do produto. Esta unidade consiste em promover a extração destes mercaptanos do GPL, utilizando uma solução de soda cáustica ou transformando-os por oxidação em produtos com mais qualidade – dissulfuretos (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

Hidrotratamento de Gasolina de Cracking

Esta unidade tem como objetivo dessulfurar, na presença de catalisadores sólidos adequados, a gasolina produzida na unidade de FCC de forma a reduzir o seu teor de enxofre e, conseqüentemente, as emissões poluentes. A gasolina é inicialmente tratada num reator onde, através de uma reação com hidrogénio, os dienos são convertidos em olefinas, sendo posteriormente separada em dois produtos: numa gasolina mais leve, que é enviada diretamente para a *pool* de gasolinas, e numa mais pesada que é enviada para a secção de dessulfuração onde, na presença de hidrogénio e catalisadores, é removido o enxofre, sendo depois enviada também para a *pool* de gasolinas (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

Alquilação

O objetivo desta unidade é produzir alquilado, utilizado como componente de gasolinas. Trata-se de um componente de elevada qualidade devido ao elevado índice de octano, à ausência de olefinas e aromáticos e à baixa densidade (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

2.1.3.1.3 Fábrica III

A fábrica III é constituída por três unidades principais: um *hydrocracker*, consiste num *cracking* catalítico na presença de hidrogénio e a pressões elevadas que converte o gasóleo de vácuo, proveniente das destilações de vácuo das fábricas I e II e de importações, em produtos mais leves e valorizáveis. Desses produtos, destacam-se o gasóleo e o *jet-fuel*, embora também se produzam naftas e GPL. A unidade instalada apresenta até 99% de conversão. Para além do *hydrocracker* a fábrica III possui ainda uma

unidade de *steam reforming* e uma unidade de recuperação de enxofre (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

2.1.3.1.4 **Fábrica de Utilidades**

As principais utilidades produzidas na fábrica de utilidades são vapor a diversas pressões, energia elétrica, água de refrigeração, ar comprimido (geral e instrumentos), fuelóleo tratado, água desgaseificada, água desmineralizada, tratamento de condensados, água bruta e água potável tratada (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

2.1.3.1.5 **Central de Cogeração**

A central de cogeração iniciou o seu funcionamento em 2009 e tem como objetivo a produção de vapor e energia elétrica, contribuindo para o aumento da eficiência energética da refinaria, exportando o remanescente para a rede elétrica (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

Na Figura A1.2, no Anexo 1, encontra-se representado um diagrama com os processos que constituem a refinaria de Sines.

2.1.3.2 **UNIDADE FCC – Craqueamento Catalítico em Leite Fluidizado**

A carga alimentada à unidade FCC pode ser muito variada, dependendo da configuração e objetivos de processamento da refinaria. A qualidade da carga tem um impacto muito significativo no funcionamento da unidade FCC, pois pode conter quantidades variáveis de materiais contaminantes, entre os quais enxofre, azoto e metais.

Atualmente em Sines, esta unidade tem como carga o VGO¹ produzido nas unidades de vácuo I e II, VGO importado, RAT que é segregado na Destilação Atmosférica para este fim, e em menor percentagem, nafta proveniente do *visbreaker*. A carga é transformada através de um processo de *cracking* catalítico em fuel gás, GPL, gasolina, *swing-cut* (componente de gasóleo), *light cyle oil* (LCO) e *slurry* (componente de fuelóleo). O GPL depois de tratado é separado em propileno, utilizado na indústria petroquímica, e butileno, utilizado como carga à unidade de alquilação. No FCC tem-se ainda a formação de coque à superfície do catalisador, que é continuamente regenerado e reenviado ao reator, sendo este transportado em leite fluidizado pela carga (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008).

O principal produto da unidade FCC é a gasolina, que depois de dessulfurada é enviada para a *pool* de gasolinas. No entanto, este processo permite, através de ajustes nas variáveis operacionais e da

¹ O VGO está dividido em LVGO (VGO leve) e HVGO (VGO pesado), este último passa por uma unidade de dessulfuração e craqueamento (*Mild Hydrocracker*) antes de ser enviado para carga ao FCC.

escolha do sistema catalítico, direcionar o perfil de rendimentos para outros produtos, respondendo às flutuações de procura do mercado

2.1.3.2.1 Descrição Geral do Processo

O processo divide-se em três etapas: reação, separação dos produtos e regeneração do catalisador, e está dividido em duas secções: secção catalítica, que inclui o reator e o regenerador do catalisador, e a secção de fracionamento onde é feita a separação dos produtos com base no seu ponto de ebulição. Na Figura 5 está representado o processo FCC no qual se baseia a unidade da refinaria de Sines.

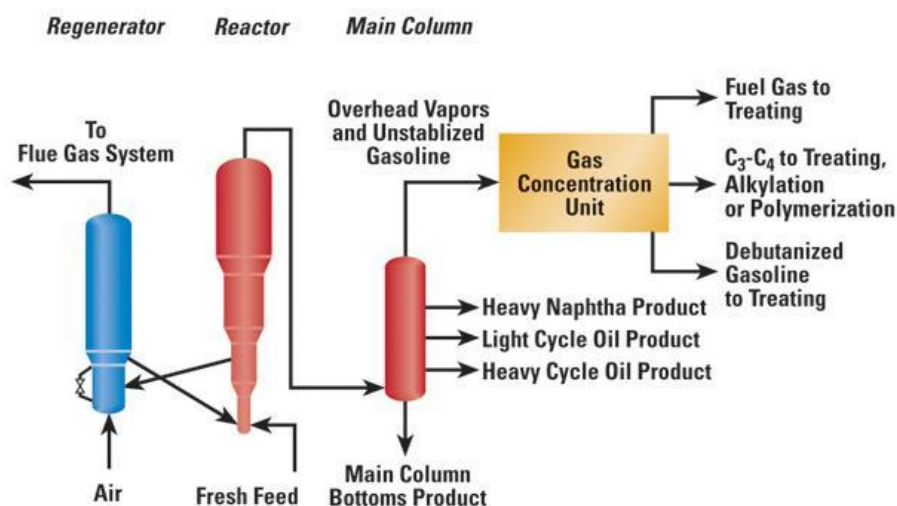


Figura 5 – Esquema simplificado do FCC licenciado pela UOP

Fonte: (UOP, 2018)

No reator é onde ocorrem as reações de craqueamento e é no regenerador que, como o nome indica, o catalisador é regenerado por queima do coque, resultando daí o calor necessário ao processo.

A carga é pré-aquecida a 200 – 250°C e introduzida na base do reator vertical (*riser*), onde entra em contacto com a corrente de catalisador quente (~700°C) proveniente do regenerador. A alimentação vaporizada (~560°C) transporta o catalisador para o interior do reator, deslocando-o para o topo, onde a pressão é mantida baixa (~0,2 MPa), com um tempo de contacto no *riser* na ordem dos 2 segundos. Ao longo do reator ocorrem as reações de craqueamento. Os produtos da reação movem-se para o topo onde são separados do catalisador, através de um sistema de ciclones, e encaminhados para a secção de fracionamento. Esta separação deve ocorrer o mais rapidamente possível de forma a minimizar a ocorrência de reações secundárias. Após a separação, o catalisador é transportado para o *stripper* onde os hidrocarbonetos que ainda se encontram depositados nas partículas de catalisador são removidos com a injeção de vapor sobreaquecido (~150°C) em contracorrente, de onde segue para o regenerador (Farracho, 2018).

A secção de fracionamento é constituída por uma coluna que recebe o efluente do reator e inicia o processo de separação dos produtos de acordo com os seus pontos de ebulição. Nesta coluna, obtém-

se, por ordem crescente de ponto de ebulição, gases de topo (gasolina de *cracking* e hidrocarbonetos leves), *swing cut*, gasóleo ligeiro (LCO), gasóleo pesado (HCO), que é recirculado, e *slurry* (resíduo do FCC). A corrente de *swing cut* é tratada numa outra unidade de hidrodessulfuração e enviada para a *pool* de diesel. O LCO e o *slurry* são componentes utilizados na produção de fuel óleo. O *slurry* é a fração com menor valor acrescentado e que, por isso, se pretende minimizar. A quantidade do resíduo é função da carga e da conversão da unidade de FCC: cargas nafténicas e aromáticas aumentam a quantidade de resíduo em comparação com cargas parafínicas (Farracho, 2018).

Os gases obtidos no topo da coluna são encaminhados para uma unidade de concentração de gases onde são separados em gasolina, GPL e fuel gás. Estes produtos são posteriormente tratados nas restantes unidades da refinaria. A gasolina é dessulfurada, numa outra unidade de dessulfuração, e enviada para *blending* de gasolinas. O GPL corresponde à fração C₃ e C₄, e é separado em propileno, vendido para a indústria petroquímica, e butileno, que é utilizado na unidade de alquilação (Farracho, 2018). O fuel gás é composto por hidrogénio, metano, etano, etileno e H₂S. Antes de abandonar a unidade FCC, esta mistura gasosa é tratada de forma a remover o H₂S, que é normalmente utilizado como matéria-prima para produção de enxofre. A concentração de metais no catalisador influi diretamente na produção destes gases, assim como o aumento de temperatura no *riser* e no regenerador, o aumento de tempo de residência dos hidrocarbonetos no *riser* e a quantidade de aromáticos na carga. O efeito cumulativo dos metais no catalisador é controlado mediante a purga de catalisador de equilíbrio e *make-up* de catalisador fresco, de forma a preservar a sua atividade catalítica (Galp, 2010).

2.2 OPORTUNIDADES IDENTIFICADAS

Mais do que nunca, as empresas necessitam de definir qual o seu propósito em relação aos seus colaboradores, à sociedade e à proteção do ambiente. Empresas como a Galp, que se dedicam ao *oil&gas* têm pela frente o desafio de redefinir o seu negócio face às mudanças inevitáveis e necessárias no sistema energético.

A Galp pretende transformar a sua refinaria de Sines num *green energy hub* até 2030, melhorando a sua eficiência energética e reduzindo a pegada carbónica. A empresa está focada na redução das emissões operacionais absolutas das atividades de refinação em 50% até 2030 (comparando a 2017). O seu aparelho industrial segue uma estratégia de adaptação contínua aos objetivos europeus de promoção da economia circular, descarbonização e transição energética, assumindo-se como referência regional nesta transformação

Como mencionado na secção 1.1, as necessidades de descarbonização global e a consequente tendência decrescente do mercado de consumo de combustíveis levam a que o investimento na produção de gasolina deixe de ser uma prioridade para as refinarias de petróleo e criam novas oportunidades de investimento focadas em produtos com mais potencial.

O crescimento do mercado petroquímico e o aumento na procura de propileno exigem que as refinarias se redefinam e procurem novas oportunidades de negócio.

Atualmente, na unidade FCC da refinaria de Sines obtém-se cerca de 6,5% de rendimento de propileno. De forma a permanecer competitiva e a acompanhar a evolução do mercado, é crucial para a Galp estudar e analisar mecanismos para maximizar esta produção de propileno na sua refinaria. Existe margem para aumentar os seus rendimentos no FCC e convertê-lo em propileno *polymer-grade*, com elevado grau de pureza, de forma a vender um produto que permita obter maior lucro.

2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O grupo Galp, enquanto detentor do complexo refinador português, procura novas oportunidades de negócio de forma a criar valor através da integração das atividades de refinação e petroquímica, em resposta ao abrandamento da procura de combustíveis e ao forte crescimento contínuo da procura petroquímica global.

Já existem várias refinarias espalhadas pelo mundo que praticam rendimentos de propileno muito acima dos 6,5% que são atualmente obtidos em Sines, pois já redirecionaram as suas unidades FCC para a maximização de propileno de forma a maximizarem os seus lucros.

O grande desafio e a questão fundamental deste estudo recairão sobre a escolha da solução economicamente mais rentável no que diz respeito à produção de propileno, e que tem em conta a procura prevista de combustíveis e o maior rendimento de propileno alcançável.

De forma a fundamentar as possíveis alternativas de melhoria a sugerir à empresa, no capítulo seguinte é feita uma revisão da literatura existente sobre as temáticas relevantes ao caso de estudo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo realiza-se a revisão de literatura necessária para esta dissertação, concretamente sobre os tipos de crude existentes, as diferentes etapas da refinação, a evolução do mercado de propileno e uma abordagem mais científica sobre tecnologias e processos que permitam maximizar os rendimentos de propileno e a posterior produção de propileno com elevado grau de pureza, na unidade FCC.

3.1 TIPOS DE *CRUDE*

Os petróleos brutos são comercializados em várias bolsas internacionais de petróleo com base na sua qualidade, locais de entrega e condições financeiras. Os locais de entrega são normalmente portos marítimos próximos dos campos petrolíferos a partir dos quais o petróleo bruto foi obtido e os preços são normalmente cotados com base *free on board* (FOB), sem consideração dos custos de entrega finais. Na Tabela A2 do Anexo 2, estão agrupados alguns tipos de petróleo, segundo Baptista (2011).

A Galp procede à gestão do aprovisionamento de crude tendo em conta variados requisitos e fatores comerciais, técnicos e ambientais como a qualidade, disponibilidade no mercado, cotação internacional, capacidade de armazenagem, maximização da margem de refinação, estratégia de diversificação de aprovisionamento e especificidades do aparelho refinador. A Galp assegura a diversificação de fontes de aprovisionamento de crudes através de um conjunto de fornecedores dispersos por vários países de forma a mitigar potenciais efeitos resultantes de possíveis eventos, como conflitos geopolíticos. Na Figura 6 estão representadas as origens dos diferentes *crudes* usados nas refinarias do grupo Galp, em 2018.

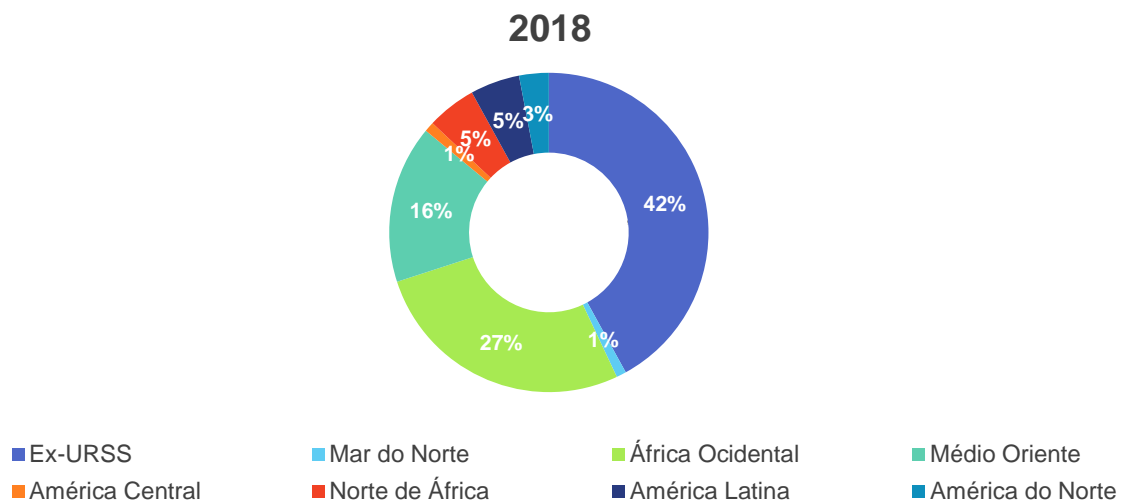


Figura 6 - Origem geográfica dos crudes usados pela Galp, em 2018.

Dados: (Galp, 2020a)

O tipo e a qualidade de produtos refinados produzidos numa refinaria dependem dos tipos de *crude* utilizados como matéria-prima e das estruturas instaladas na refinaria. Os *crudes* podem ser agrupados em *crudes sweet* - mais leves e com um teor de enxofre inferior a 1% em peso no RAT, são mais caros – e *crudes sour* - mais pesados, com teor de enxofre superior a 1% em peso no RAT e são mais baratos. Em 2015 foram processados 62% de *crude sweet* e 38% de *crude sour*, na refinaria de Sines (Galp, 2015b). Desde Janeiro 2020, com a introdução do “IMO 2020” (*International Maritime Organization*), que obrigou a uma redução de 80% nas emissões de enxofre para produzir um fuel com um teor máximo em enxofre de 0.5%wt, a refinaria de Sines passou a processar 100% de *crudes sweet*.

Com uma capacidade atual de destilação de aproximadamente 226 mil barris por dia, a refinaria de Sines é a única refinaria em Portugal, e uma das maiores refinarias da Península Ibérica (Galp, 2021a).

3.2 ETAPAS DA REFINAÇÃO

Existem quatro principais etapas da refinação para separação do *crude* em substâncias utilizáveis: separação física dos tipos de hidrocarbonetos através da destilação, purificação de produtos intermédios em unidades de pré-tratamento, processamento químico das frações de menor valor em produtos mais leves e valorizáveis, e tratamento de produtos intermédios por remoção de elementos e compostos indesejáveis (contaminantes) para integração em produtos finais (Galp, 2020d).

O processo de refinação tem sempre início com o aquecimento do petróleo bruto: os vapores formados sobem por uma coluna de fracionamento (destilação atmosférica), que está equipada com pratos de equilíbrio a diferentes alturas. Os componentes mais voláteis e com ponto de ebulição mais baixo sobem ao topo dessa coluna e nas camadas mais baixas ficam os componentes com ponto de ebulição mais elevado (mais pesados). Esta técnica de separação física das frações é também designada de destilação fracionada e é o ponto de partida para o processo de refinação do petróleo. No Anexo 3, na Figura A3, está esquematizada uma coluna de destilação que retrata este processo.

As refinarias podem geralmente ser divididas em refinarias simples de *hydroskimming* - onde se realiza principalmente o processo de destilação - e refinarias complexas (de *cracking* e *hydrocracking*), onde se desenvolvem funções adicionais como a conversão/craqueamento das frações de hidrocarbonetos produzidas no processo de destilação do *crude* noutros produtos e o tratamento de produtos intermédios para se obterem produtos de maior valor.

A complexidade de uma refinaria está tipicamente relacionada com a gama de matérias-primas que consegue processar, matéria-prima, como *crudes* mais pesados e com maior teor de enxofre, em produtos com valor acrescentado. Quanto maior a complexidade, mais flexível a gama de *crudes* que a refinaria consegue processar e mais bem posicionada está para tirar partido dos *crudes* com custos mais baixos, o que resulta num incremento das margens de refinação. A refinaria de Sines é considerada uma refinaria complexa, dispondo de unidades de *cracking* catalítico e *hydrocracking* (Galp, 2020d).

Cada um dos passos do processo de refinação destina-se a criar e maximizar valor acrescentado às matérias nele processadas (Galp, 2020a).

Na secção 2.1.3.1, mencionada anteriormente, encontram-se descritos com maior detalhe as unidades e processos de refinação de petróleo que constituem a refinaria de Sines.

3.3 PROPILENO

O propileno pertence à classe das olefinas e é um hidrocarboneto volátil e extremamente inflamável. É o segundo maior volume químico produzido globalmente, e uma matéria-prima importante para a produção de produtos químicos como o polipropileno (PP), o acrilonitrilo, o óxido de propileno bem como para uma grande variedade de produtos industriais, como mostra a Figura 7.

Propileno por aplicação

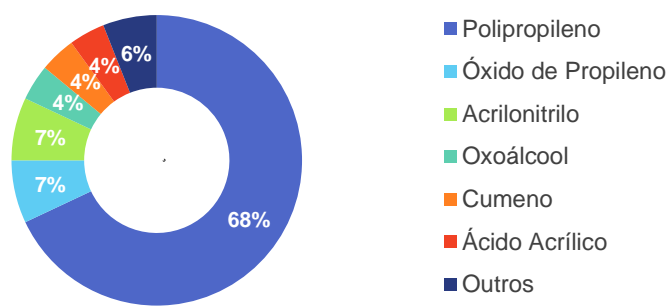


Figura 7 - Utilizações finais de propileno.

Fonte: (Jones, Dunwoodie, Boucher-Ferte, & Reiff, 2011)

O propileno pode ser produzido como subproduto da refinação de petróleo (30%, dos quais 97% são obtidos pelo FCC), como subproduto da produção de etileno em *steam crackers* (57%) e também por processos *on-purpose* (13%) - em instalações de desidrogenação de propano, metástase entre outras. É um dos intermediários químicos industriais mais importantes, que serve como base para a obtenção de muitos produtos químicos e plásticos, tendo sido também o primeiro petroquímico utilizado à escala industrial (Intratec, 2013).

3.3.1 Procura por Região

O mercado global de propileno deverá crescer a uma CAGR (taxa de crescimento anual composta) em torno de 6% entre 2016 e 2025, devido à crescente industrialização (TechSci, 2017). Este crescimento é impulsionado principalmente pelos mercados em desenvolvimento na Ásia, particularmente na China. O consumo de propileno varia por região, com base na capacidade de desenvolver derivados a jusante. Na Figura 8 observa-se o consumo de propileno por grande região: a China é apresentada como maior consumidor de propileno, seguida pelo resto da Ásia. A Europa e a América do Norte apresentam consumos bastante semelhantes entre eles (IHS Markit, 2019).

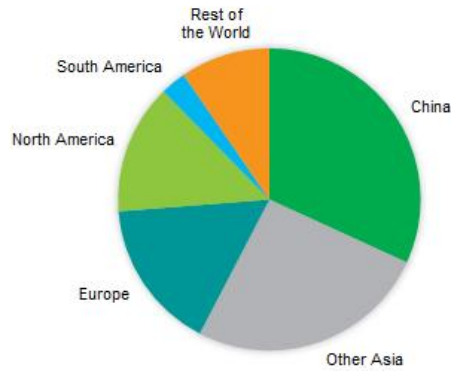


Figura 8 - Consumo global de propileno em 2019.

Fonte: (IHS Markit, 2019)

O mundo consumiu mais de 100 milhões de toneladas de propileno em 2017 e necessitará de 135 milhões de toneladas até 2025 para satisfazer o crescimento previsto da procura mundial (Wood Mackenzie, 2018).

3.3.2 Polipropileno

O polipropileno, responsável pelo consumo de cerca de 70% de propileno produzido, pertence ao grupo dos plásticos com maior volume no mundo e apresenta uma grande versatilidade com diferentes utilizações como brinquedos, embalagens, eletrodomésticos, fibras e tecidos, materiais hospitalares, indústria automóvel, mobília, pranchas de surf, entre outras. Na Figura 9 estão representadas as diferentes percentagens das utilizações de polipropileno.

Principais utilizadores finais do polipropileno

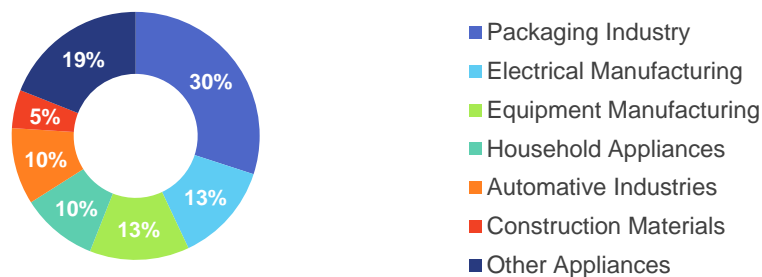


Figura 9 - Distribuição das diferentes utilizações de Polipropileno.

Fonte: (Rogers, 2014)

No entanto, o PP é um dos plásticos pós-consumo menos reciclados, a uma taxa inferior a 1% para a recuperação pós-consumo. Devido à curta duração de vida das embalagens feitas de PP, a maioria destes termoplásticos acaba em aterros, onde se degradam lentamente e levam cerca de 20 a 30 anos a decompor-se completamente. Esta característica suscita graves preocupações ambientais, pelo que a reciclagem do polipropileno é a melhor opção disponível para lidar com esta situação de uma forma ecológica e rentável.

3.3.2.1 Evolução da Procura

O polipropileno é projetado para dominar o mercado global de propileno devido à crescente regulamentação governamental para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no meio ambiente, apoiado pelo enorme crescimento na produção de veículos comerciais leves e indústrias de embalagens. Com capacidade para atingir mais de 88,8 milhões de toneladas até 2025, o polipropileno trará ganhos, criando um impulso significativo do crescimento global. O tamanho do mercado global de polipropileno está previsto atingir 122,31 mil milhões de dólares até 2026. De acordo com o relatório da Fortune Business Insights, o valor de mercado estava em 79,85 mil milhões de dólares em 2018. Espera-se que o mercado registre uma CAGR de 5,5% de 2019 a 2026 (Fortune Business Insights, 2019).

Estima-se que o Pacífico Asiático seja o maior mercado para o polipropileno, sendo que a China representa a maior fatia deste mercado até 2022, e com maior crescimento. Os principais produtores de polipropileno, como Formosa Plastics Group (Taiwan), China Petrochemical Corporation, LG Chem (Coreia do Sul) e Sumitomo Chemical (Japão) estão no Pacífico Asiático. A Europa é responsável pela segunda maior quota do mercado global de polipropileno, como se pode observar na Figura 10 (Polypropylene Market by Type, 2018).

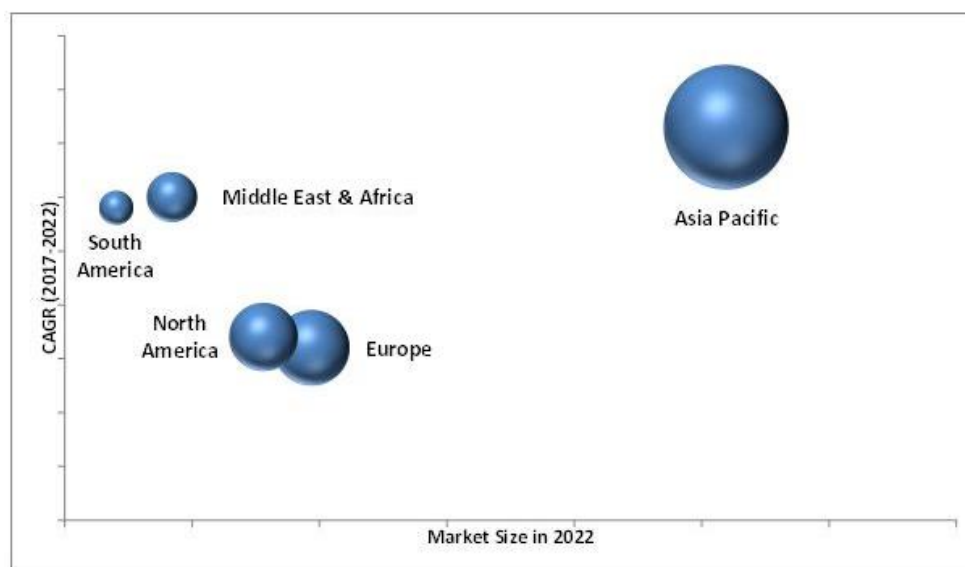


Figura 10 - Tamanho de mercado do PP por região

Fonte: (Polypropylene Market by Type, 2018)

Numa refinaria, o propileno é frequentemente separado e vendido como matéria-prima à indústria petroquímica para a produção de plásticos de polipropileno. A unidade FCC continua a ser um método flexível e rentável para aumentar a produção de propileno, a fim de preencher a lacuna da procura.

3.4 MAXIMIZAÇÃO DE PROPILENO NO FCC

O aumento da produção de propileno nas unidades FCC das refinarias tem sido um tema discutido nos últimos anos, com referência tanto à construção de novas unidades como às unidades existentes. Uma das principais questões é como equilibrar adequadamente a produção máxima de gasolina e a produção máxima de propileno, já que as olefinas da faixa de destilação da gasolina também são craqueadas. O ideal é normalmente entre estes dois extremos. O rendimento base médio de propileno numa unidade FCC é de cerca de 5% em peso da sua alimentação. Com a forte procura do mercado e a potencial capacidade de alcançar rendimentos mais elevados de propileno, existe um desejo natural de maximizar estes rendimentos. No entanto, há forças económicas concorrentes sugerindo que o rendimento ótimo de propileno seja de 10 a 11% em peso, o que é substancialmente menor do que a tecnologia atual pode produzir (Couch, Glavin, Wegerer, & Qafisheh, 2007).

Na Figura 11 estão representados os diferentes modos de operar o FCC, com a produção de propileno em detrimento da produção de gasolina: maximização de gasolina, maximização de destilado e GPL e maximização de propileno.

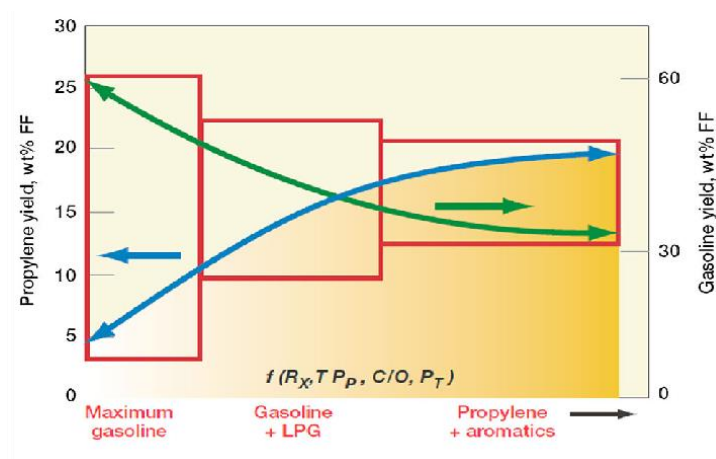


Figura 11 – Projeção dos rendimentos de propileno em função da gasolina, numa unidade FCC

Fonte: (Couch, Glavin, Wegerer, & Qafisheh, 2007)

O incremento do rendimento em propileno no FCC, acima do cenário base, pode ser agrupado em três intervalos (Knight & Mehlberg, 2011):

1. Entre 3% a 5% - através de modificações no sistema catalítico e de um aumento da temperatura do reator. Normalmente, tais aumentos requerem apenas alterações modestas na secção de recuperação e uma verificação metalúrgica para determinar a capacidade de acomodar o aumento da temperatura do reator.
2. Entre 5% a 9% - O mesmo que o indicado no ponto 1 juntamente com a redução da pressão parcial dos hidrocarbonetos. Isto é conseguido através da redução da pressão do reator ou da adição de vapor ao reator. A implementação pode exigir modificações para permitir uma

capacidade adicional de compressão de gás húmido, capacidade de condensação da coluna principal e capacidade de condensação de água ácida.

3. Superior a 9% - O mesmo que no ponto 2 juntamente com a recirculação orientada de GPL e nafta. Isto representa o cenário final de produção de propileno e exigirá a reconfiguração da unidade de concentração de gás para facilitar a utilização da recirculação. Pode considerar-se a aplicação de nova tecnologia que exigirá extensas modificações na secção do reator, uma vez que será acrescentado um segundo reator.

3.4.1 Sistema Catalítico

Numa unidade FCC é utilizado um sistema catalítico que consiste numa mistura de catalisador e aditivos.

Catalisadores são, por definição, substâncias que aumentam a velocidade de reações químicas. A proporção dos componentes do catalisador varia de acordo com as condições de operação e os resultados desejados para a unidade FCC. De forma geral, encontram-se catalisadores contendo entre 15 a 50% de zeólito, 5 a 30% de matriz inerte e proporções variadas de outros pequenos complementos (Einsfeldt, 2006). O *cracking* catalítico do FCC é um processo que utiliza um catalisador em forma de pequenas partículas esféricas que circulam continuamente na zona de reação e regeneração. O catalisador vai desativar-se muito rapidamente por depósito de coque sendo posteriormente restaurada a sua atividade queimando esse mesmo coque, numa zona de regeneração.

Atualmente utilizam-se zeólitos do tipo Y para as reações de *cracking* catalítico, pois possuem maior estabilidade nas condições operacionais do processo. Outro tipo de zeólito utilizado nas unidades FCC, mas que é caracterizado como um aditivo, é o zeólito ZSM-5.

3.4.1.1 Catalisador

O catalisador atual usado no FCC de Sines é fornecido pela BASF e é dedicado à maximização de nafta. Existem no mercado catalisadores cujo objetivo é a maximização de propileno, pelo que a substituição do catalisador é uma hipótese viável de aumentar a produção de propileno na refinaria e de cumprir com as expectativas da empresa.

3.4.1.2 Aditivo

ZSM-5

Os zeólitos constituem um grupo numeroso de minerais de estrutura porosa e são conhecidos como peneiros moleculares.

O uso do zeólito ZSM-5 (*Zeolite Socony Mobil-5*) como aditivo para catalisadores é bastante conhecido pelos especialistas. Os aditivos à base de ZSM-5 convertem olefinas da gama da gasolina em olefinas

leves (de GPL), como o propileno, aumentando simultaneamente a octanagem da gasolina. As suas características ácidas favorecem as reações de *cracking* e isomerização de hidrocarbonetos, enquanto que a sua estrutura porosa restringe a formação de compostos com cadeias carbónicas volumosas, contribuindo para uma menor formação de coque, resultando numa maior estabilidade catalítica (Costa, Cerqueira, Ferreira, Ruiz, & Menezes, 2007).

O zeólito ZSM-5 possui alta relação sílica/alumina e abertura de poros (aproximadamente 0,5 nm), inferior ao zeólito Y, tradicionalmente utilizado nos catalisadores de *cracking* catalítico, e por isso é apropriado para o processamento de moléculas com tamanhos menores que o diâmetro dos seus poros. Por outro lado, o zeólito Y catalisa reações de transferência de hidrogénio formando compostos aromáticos que não podem ser revertidos em hidrocarbonetos leves.

No entanto, a aplicação de grandes quantidades de aditivo contendo unicamente o zeólito ZSM-5 pode provocar a queda na atividade do sistema catalítico, efeito conhecido como diluição. Consequentemente, o uso de sistemas catalíticos contendo zeólitos ZSM-5 e Y tende a apresentar um limite máximo de rendimento para olefinas leves, particularmente para o propileno. Assim, tem sido objeto de estudo a obtenção de uma composição catalítica que seja capaz de expandir os limites de rendimento para as olefinas leves ao ser aplicada em processos de *cracking* catalítico (Almeida, et al., 2013).

Quantidade de Aditivo

Neste momento, na unidade FCC de Sines utiliza-se uma percentagem reduzida de um aditivo denominado ZIP. cuja composição possui 40% de zeólito ZSM-5. A incorporação de ZIP para maximização de propileno varia entre 10% a 15%, sendo que até 12% de incorporação o aumento de rendimento de propileno é linear: por cada 1% de aditivo aumenta-se entre 0,2% e 0,3% na produção de propileno. A BASF, fornecedora deste aditivo, acredita que é possível chegar aos 15% de ZIP e obter um rendimento de cerca de 10% em propileno.

Caso se opte por alterar o aditivo, é necessário ajustar com os fornecedores as proporções de aditivo que devem ser praticadas no FCC de forma a maximizar o propileno, cumprindo as limitações e capacidade existente, ou em caso de necessidade e se se justificar economicamente, fazendo um *revamp* ao FCC.

Tipo de Aditivo

Os aditivos são substâncias que atuam de forma complementar ao catalisador e possuem um objetivo específico e predefinido. Proporcionam condições de operação como reduções na emissão de poluentes e no envenenamento do catalisador.

Existem diferentes aditivos que permitem aumentar o rendimento de olefinas leves na unidade FCC, atingindo rendimentos maiores do que o normal, e que são combinados em proporções adequadas

com catalisadores típicos para uso em processos de *cracking* catalítico. Estes aditivos podem aumentar significativamente a produção de propileno no FCC das refinarias. Possuem uma ação rápida, o que significa que as variações de rendimento podem normalmente ser observadas após a primeira semana de adição.

3.4.1.3 Aditivos no Mercado

Estão presentes no mercado várias misturas de aditivos com o propósito de maximizar a produção de propileno, pertencentes a diferentes fornecedores. Todas as misturas têm em comum o zeólito ZSM-5, por ser o aditivo mais eficaz conhecido até agora para o efeito, embora que em diferentes quantidades e concentrações. Os efeitos da maximização dependerão também da matéria-prima, das condições de funcionamento da unidade e do tipo de catalisador adicionado ao FCC.

Existem várias empresas que fornecem aditivos e catalisadores. Na secção que se segue serão apresentados alguns, nomeadamente os mais recentes e dos fornecedores mais relevantes.

3.4.1.3.1 BASF

A BASF, empresa química alemã e líder mundial na área química, é a atual fornecedora do aditivo ZIP *Olefins* da unidade FCC da refinaria de Sines.

Aditivo ZIP *Olefins*

O aditivo ZIP *Olefins* proporciona a maximização da produção de propileno. O catalisador que atualmente é usado na refinaria de Sines é dedicado à maximização de nafta, e por isso não é a escolha ótima para maximizar propileno. Existem catalisadores próprios para esse objetivo.

O ZIP emprega tratamento com fósforo em várias fases que melhora a estabilização do zeólito ZSM-5 e gera mais sítios ácidos produtores de propileno. A capacidade do ZIP para gerar mais GPL e maximizar o rendimento em propileno garante uma diluição mínima da atividade do catalisador base (BASF, 2015). Este aditivo tem 40% de ZSM-5 puro.

Aditivo ZEAL™

A BASF anunciou recentemente o lançamento comercial do aditivo ZEAL™, concebido para melhorar a produção de olefinas leves em unidades FCC que processam resíduos ou gasóleos como alimentação. O ZEAL foi otimizado para fornecer rendimentos superiores de propileno, mantendo o desempenho do catalisador de base. As aplicações bem-sucedidas demonstraram a capacidade do ZEAL em proporcionar flexibilidade operacional à medida que as refinarias se orientam, cada vez mais, para uma configuração *crude-to-chemicals* no futuro (BASF, 2020).

Por ser um aditivo novo, à data deste projeto ainda não existe informação pública sobre este aditivo e sobre os seus resultados em refinarias de petróleo.

3.4.1.3.2 GRACE

A GRACE é uma empresa química americana de produtos químicos que possui uma unidade dedicada ao fabrico de catalisadores químicos e catalisadores de refinação. Introduziu o seu primeiro aditivo à base de ZSM-5 para utilização na unidade FCC em 1984.

Aditivos OlefinsMax® e OlefinsUltra®

Os aditivos mais recentes da GRACE são o OlefinsMax® e o OlefinsUltra®, que oferecem uma gama de atividades que satisfazem as necessidades específicas das refinarias para aumentar o propileno e a octanagem da gasolina, com excelente atividade e estabilidade. A cada 1% de aditivo OlefinsMax® adicionado ao catalisador, o rendimento em propileno aumenta entre 0,3% a 0,4% e a gasolina decresce em 0,7% (GRACE, 2019).

A GRACE comercializa o ProtAgon™, um sistema de catalisador para a maximização do propileno. O elevado grau de complexidade do ProtAgon™ exige uma afinação cuidadosa e personalizada às propriedades da alimentação e restrições específicas do modo de funcionamento da unidade FCC. Os catalisadores ProtAgon™ são totalmente compatíveis com os aditivos ZSM-5 OlefinsMax®, OlefinsUltra®, que podem ser utilizados para ajustar o rendimento das olefinas leves (GRACE, 2014).

3.4.1.3.3 JOHNSON MATTHEY

A JOHNSON MATTHEY é uma empresa multinacional britânica, sediada no Reino Unido, especialista em química e tecnologias sustentáveis.

Aditivos INTERCAT™

A gama de aditivos INTERCAT compreende os aditivos PENTACAT™ HP, PROPYL MAX™, SUPER Z™, SUPER Z EXCEL, e SUPER Z EXCEED. Permite aos refinadores tirar o máximo partido das sinergias existentes na unidade FCC para que possam otimizar continuamente os rendimentos e minimizar as emissões, permitindo a capacidade de adaptar a seletividade da unidade, aumentar o rendimento do GPL em detrimento do LCO e HCO e reduzir as emissões de SO_x, NO_x e CO do regenerador. Quando a procura de propileno é elevada, os aditivos INTERCAT™ são altamente seletivos para partir moléculas da gama de gasolina de baixo teor de octano para olefinas C₃ e C₄, sem aumento do coque ou C₂ e gases mais leves. Adicionar pequenas doses de aditivo ao longo de um período de 24 horas pode ser até três vezes mais eficiente do que a adição de grandes quantidades no final de cada turno.

Os sistemas de adição INTERCAT têm sido largamente utilizados desde meados da década de 80, e hoje existem mais de 300 unidades instaladas em refinarias em todo o mundo (Johnson Matthey, 2018).

3.4.2 Temperatura

O aumento da temperatura da reação aumenta diretamente a produção de fuel gás, propileno e gasolina até ao ponto de *overcracking*. Acima deste ponto, a quantidade de propileno produzido por unidade de conversão aumenta à medida que a gasolina é craqueada, aumentando também o rendimento em produtos indesejáveis como o fuel gás e o coque.

O aumento do caudal de fuel gás geralmente limita a temperatura de reação. Uma maior produção de fuel gás pode levar a uma redução na conversão da carga, o que não é desejável do ponto de vista da otimização. Um ajuste no sistema catalítico pode levar a um menor rendimento de fuel gás por unidade de aumento de conversão. Para limitar a produção de fuel gás é necessário uma relação catalisador/óleo máxima e uma temperatura de carga mínima. Quanto menor a produção de fuel gás menor é o caudal de gás líquido, mais propileno pode ser comprimido e torna-se mais fácil a recuperação de propileno (Penna, 2012).

A variação da temperatura é uma solução simples e que pode ser implementada de imediato, é fiável e não exige investimento por parte da empresa.

3.4.3 Tecnologia

O aditivo ZSM-5 apenas é capaz de craquear olefinas C₇ a C₁₀ para GPL. Consequentemente, a maior parte do corte de C₅ e C₆ não é convertido pelo ZSM-5 no *riser*² principal.

O sistema catalítico ótimo, a fim de contornar esta situação, é um sistema de recirculação num *riser* separado, que funciona em condições mais severas. A recirculação com a alimentação não permite a conversão desta nafta leve, uma vez que a temperatura é demasiado baixa no *riser* principal. A recirculação da nafta leve num *riser* separado e a uma temperatura superior à do *riser* principal permite craquear as olefinas C₅ e C₆ para atingir mais GPL, que depois de tratado vai ser separado em propileno. A unidade de FCC de Sines possui apenas um *riser*, pelo que esta solução implicaria um investimento para a Galp.

A Axens, grupo que fornece uma gama de soluções para a conversão de petróleo em combustíveis menos poluentes, comercializa esta tecnologia, e está patenteada sob o nome de PetroRiser™ (Axens, 2020). A UOP, enquanto empresa de desenvolvimento de tecnologia para a refinação de petróleo, também desenvolve tecnologias idênticas.

² Parte integrante do conversor do FCC, tubo vertical no qual a carga é introduzida e ascende até entrada no vaso separador.

3.4.4 Casos de Estudo

Nesta secção são apresentados dois ensaios executados em duas refinarias (na Eslováquia e no Brasil) onde foi testada a hipótese de maximização de propileno nas suas unidades FCC, à semelhança do que está a ser estudado para a refinaria de Sines. Ambos os casos ilustram a aplicação das metodologias propostas neste projeto.

3.4.4.1 Experiência numa empresa na Eslováquia

Com vista a aumentar a produção de propileno foi efetuado um ensaio na unidade FCC de uma refinaria na Eslováquia (pertencente à empresa Slovnaft) que tem como principal objetivo a produção de gasolina e GPL. A produção típica de propileno da refinaria de Bratislava era de aproximadamente 6% em peso. A experiência da indústria mostrou que as unidades normais do FCC com alimentação VGO são tipicamente capazes de produzir até 10-12 % em peso de propileno, implementando técnicas relativamente simples. A Slovnaft realizou uma investigação e concluiu que a forma mais eficaz de aumentar a produção de propileno da FCC seria a utilização de um aditivo com ZSM-5 de elevada atividade: o aditivo escolhido para o ensaio foi o Super Z Excel (SZE). A principal mudança de rendimento esperada era um aumento do rendimento em propileno seguido de um aumento do rendimento do butileno. Com a presença do aditivo o rendimento de propileno passou a 9%, um aumento de 50% comparando com os 6% anteriores. Quando o Super Z Excel começou a ser adicionado à unidade FCC, o rendimento em propileno respondeu quase imediatamente. Os resultados deste teste mostram um aumento rápido e significativo das olefinas. A Figura 12 apresenta a variação no rendimento em propileno em função da quantidade de SZE introduzido (Látka, Oleríny, Kováč, & Ventham, 2016).

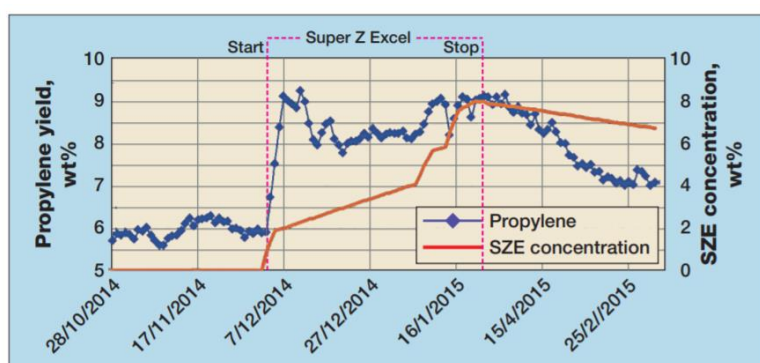


Figura 12 - Rendimento em propileno em função da concentração de aditivo, em percentagem mássica.

Fonte: (Látka, Oleríny, Kováč, & Ventham, 2016)

3.4.4.2 Experiência numa empresa no Brasil

Este estudo consiste em analisar as mudanças que devem ser realizadas na unidade FCC da Petrobras para permitir o aumento da produção de propileno através do aumento da temperatura de reação, passando de 545°C para uma temperatura de 560°C, e de adição de zeólito ZSM-5, não existindo presença de ZSM-5 no catalisador inicial e adicionando 4% de ZSM-5 no sistema catalítico.

O rendimento médio de propileno nas unidades FCC da Petrobras é cerca de 5% em peso em relação à carga. Um aumento de mais de 100% na produção de propileno pode ser obtido utilizando condições operacionais de média severidade e quantidades moderadas de zeólito ZSM-5 no sistema catalítico do FCC. O catalisador comercial utilizado durante o ensaio apresentava na sua composição um aditivo com 40% de ZSM-5 e foi misturado em diferentes proporções com o catalisador de equilíbrio. Foram avaliadas duas temperaturas de reação, 545 e 560°C com diferentes teores de ZSM-5 na mistura: 0, 2, 4, 8, até 12% em peso (Penna, 2012).

O aumento da temperatura de reação de 545°C para 560°C, associado ao aumento do teor de ZSM-5 no catalisador, proporciona um ganho no rendimento de propileno de 4,7 % em peso. O aumento adicional de ZSM-5 de 4% para 8% contribui com um aumento de apenas 1,3 % em peso de propileno. Um novo aumento no conteúdo de ZSM-5 para 12% fornece um ganho ainda mais reduzido.

O aumento incremental de propileno é sempre acompanhado de um aumento da produção de correntes mais pesadas (*slurry*), que possuem menor valor de mercado, e diminuição da corrente de nafta craqueada. Desta forma, foi escolhido para o caso de estudo o perfil com conteúdo de 4% de ZSM-5 no catalisador e temperatura de reação de 560°C, pois além de proporcionar um aumento significativo no rendimento de propileno, fornece um perfil de produtos mais equilibrado, com baixa produção de correntes líquidas pesadas e ainda otimiza o uso do zeólito ZSM-5, cujo custo é mais elevado comparando com o catalisador de FCC com zeólito Y (Penna, 2012). Esta análise está representada na Figura 13.

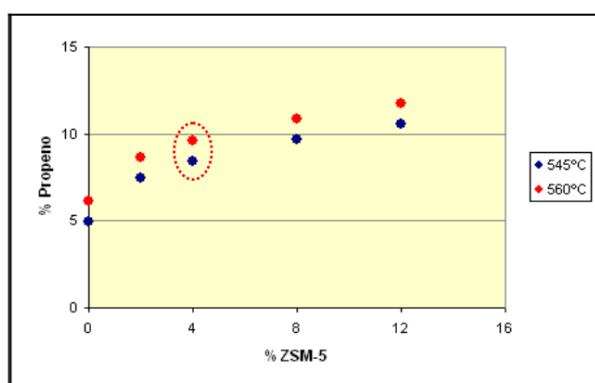


Figura 13 - Variação no rendimento de propileno em função do teor de ZSM-5, a 545°C e a 560°C.

Fonte: (Penna, 2012)

3.4.5 Limitações

As limitações da unidade FCC encontram-se tipicamente na secção de concentração de gás - Merox de GPL. Merox é um acrónimo de oxidação de mercaptanos, e é um processo químico catalítico patenteado, desenvolvido pela UOP, utilizado em refinarias de petróleo e instalações de processamento de gás natural para remover mercaptanos do GPL, propano, butanos, naftas leves, querosene e combustível para motores de reação, convertendo-os em dissulfuretos de hidrocarbonetos líquidos.

Ao maximizar a produção de GPL é preciso garantir que existe capacidade na merox para processar os aumentos de propileno e butileno registados. Neste momento a merox da refinaria de Sines está a trabalhar na sua capacidade máxima, pelo que para aumentar os rendimentos de propileno na unidade FCC será necessário fazer uma reformulação (*revamp*) à merox, aumentando a sua capacidade. A avaliação deste *revamp* foi avaliada com a UOP, por forma a determinar a capacidade máxima a ser considerada neste estudo.

3.5 PROPILENO POLYMER-GRADE

A comercialização de propileno é feita com base em diferentes tipos de grau de pureza: grau polimérico, mais conhecido por *polymer-grade* (PG) e com uma pureza mínima de 99,5%; grau químico, denominado *chemical-grade* (CG) com uma pureza mínima de 93%; e grau de refinação, chamado de *refinery-grade* (RG) com uma pureza de cerca de 70% (ICIS, 2010). A Refinaria de Sines produz um propileno *refinery grade*, com uma pureza de cerca de 75%.

As três qualidades comerciais de propileno são utilizadas para diferentes aplicações. O propileno RG é utilizado para GPL, para utilização térmica ou como componentes de octanagem da gasolina para motores, mas o mercado mais significativo é a conversão para propileno PG ou CG. O propileno CG é amplamente utilizado para a maior parte dos derivados químicos e o propileno PG é utilizado no fabrico de polipropileno, de óxido de propileno, entre outros (Intratec, 2013).

O preço a que se vende o propileno *polymer-grade* é cerca de 25% superior ao preço do *refinery-grade*. Este resultado proporciona oportunidades para as refinarias considerarem investimentos que possam alcançar taxas de retorno atrativas.

A solução para a recuperação de propileno polymer grade é a instalação de um *splitter* que separa o propileno do propano e outros componentes leves presentes na corrente.

3.5.1 *Splitter de C₃*

A maior parte das grandes instalações de separação de propileno/propano utiliza um conceito de bomba de calor, em vez de um sistema de destilação convencional com um *reboiler*³ a vapor de baixa pressão e um condensador. Um sistema de bomba de calor utiliza um compressor para reduzir a pressão da torre de modo a permitir que a coluna de destilação seja menor. Na maioria das aplicações de destilação as volatilidades relativas podem ser melhoradas através da redução da pressão da coluna. Isto resulta num menor número de pratos teóricos necessários e de menor razão de refluxo. Esta poupança é compensada pelo custo energético necessário do compressor (Zygula & Kolmetz, 2011). A Figura 14 mostra um diagrama simplificado do processo de uma configuração de bomba de calor única. O vapor obtido no topo da coluna é comprimido e uma porção é condensada no *reboiler* de onde o condensado é devolvido ao prato superior como refluxo. O produto líquido mais o refluxo adicional são condensados num permutador de calor paralelo. Este tipo de design funciona para torres que têm uma pressão de funcionamento de coluna superior a 125 psig. Os *splitters* de C₃ precisam de funcionar a uma pressão de aproximadamente 265 psig para poderem utilizar água de arrefecimento para o condensador de topo. Embora a maioria das refinarias disponha de vapor de baixa pressão em excesso ou de outras fontes de calor de baixo nível, a magnitude dos requisitos para o *reboiling*, bem como a necessidade de água de arrefecimento para os condensadores suspensos, favorecem geralmente o projeto da bomba de calor (Palmer, Glasgow, Nijhawan, Clark, & Guzman, 2012).

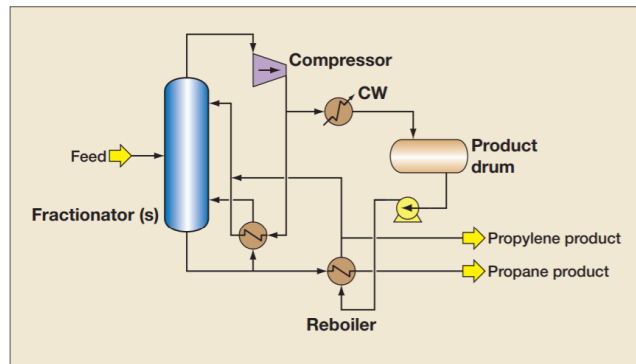


Figura 14 – Diagrama de um Splitter de C₃ com bomba de calor, à pressão da torre de mais de 125 psig.

Fonte: (Palmer, Glasgow, Nijhawan, Clark, & Guzman, 2012)

³ Permutadores de calor normalmente utilizados para fornecer calor ao fundo das colunas de destilação industrial.

Variáveis do processo e considerações sobre o equipamento

Há uma quantidade de variáveis de processo que afetam as dimensões do equipamento e os custos operacionais. Como todos os sistemas de fracionamento, para uma determinada separação, o número de andares da coluna necessários é inversamente proporcional ao número de *reboilers*, condensadores e diâmetros das torres. Este efeito é mais pronunciado à medida que a pressão de funcionamento é aumentada. A Figura 15 mostra esta relação para um processo de separação de 6000 bpd (barris por dia) de C_3 que produz um propileno *polymer-grade* e propano que cumpre as especificações HD-5⁴. Com uma torre a funcionar a 265 psig o *reboiler* necessita de 107,8 MM Btu/hr. O diâmetro da torre aumenta em conformidade. Verifica-se que este efeito é menos dramático à medida que aumenta o número de andares de fracionamento. Dependendo do número de andares, podem ser necessárias duas torres, sendo que numa única torre podem ser acomodados entre 150 a 200 andares. O vento ou as cargas sísmicas, podem obrigar a distribuição da altura da coluna por duas torres, e conseqüentemente aumentar o custo global. Nem todas as torres podem sempre ser fabricadas em oficina e transportadas para o local da obra. Depende do comprimento e do diâmetro da torre, dos acessos às instalações da refinaria e das limitações de transporte. Todos estes fatores devem ser estudados uma vez que incorrem em custos.

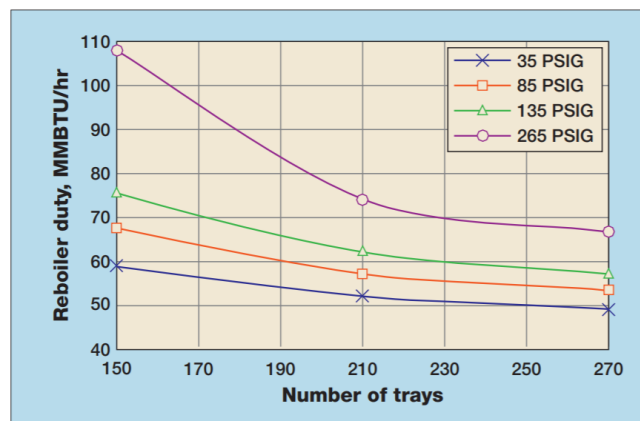


Figura 15 - Avaliação projeto da torre do Splitter, para um processo de separação de 6000 b/d de C_3 .

Fonte: (Palmer, Glasgow, Nijhawan, Clark, & Guzman, 2012)

⁴ O propano de grau HD5 é o propano de grau mais elevado disponível para os consumidores e é o que as empresas de propano normalmente vendem aos seus clientes. As suas especificações consistem em: mínimo de 90% de propano, máximo de 5% de propileno.

Considerações fora do *Splitter*

As principais questões a considerar fora do *Splitter* de C₃ são (Palmer, Glasgow, Nijhawan, Clark, & Guzman, 2012):

1. Pré-fracionamento do C₃ antes do separador - as especificações típicas para propileno *polymer-grade* limitam as concentrações de etileno e etano a cerca de 30 e 500 mol ppm, respetivamente e um total de butano/buteno (BB) a menos de 50 mol ppm;
2. Tratamento do Produto;
3. Armazenamento do produto - o produto acabado pode ser armazenado em esferas, esferas semi-refrigeradas ou tanques refrigerados. Os fatores envolvidos nesta decisão são o modo de transporte do produto, os ciclos e dimensões de expedição e o custo. O armazenamento requer altas pressões.

3.5.2 Fornecedores de *Splitters* de C3

Não foi possível, até ao momento, obter informação relevante sobre unidades de recuperação de propileno de outros fornecedores para além da UOP, por não haver informação pública publicada. No entanto sabe-se que empresas como a Axens, a TechnipFMC e a KLM também fornecem este tipo de equipamento. Por ser fornecedora da Galp, a UOP quando contactada facultou informação sobre a sua tecnologia de recuperação de propileno.

UOP

A UOP é uma empresa multinacional de desenvolvimento e fornecimento de tecnologia para a refinação de petróleo, processamento de gás natural e GPL, produção petroquímica e principalmente indústrias de importância no setor químico. A tecnologia FCC™ da refinaria de Sines é licenciada pela UOP.

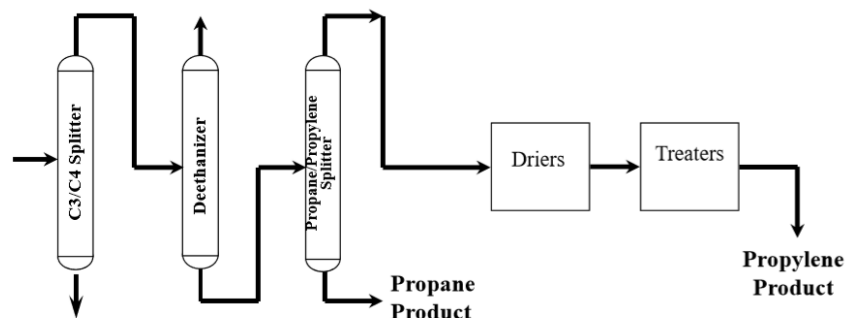


Figura 16 - Esquema de fluxo de processo da PRU da UOP

Fonte: (UOP, 2020)

A função da sua Unidade de Recuperação de Propileno (PRU) é preparar a carga para processamento a jusante numa unidade de polimerização, purificar o fluxo de hidrocarbonetos até 99,5 mol%, secar o produto e remover as impurezas dos contaminantes polares/não polares. Na Figura 16 está representado o esquema da unidade em questão. Após o *splitter* de C₃ existem ainda dois secadores com o objetivo de remover a água absorvida e um processo de tratamento de propileno que remove vestígios de metais (UOP, 2020). Esta unidade está otimizada e tem em conta poupanças significativas quando comparada com outros sistemas.

3.5.3 Estudo de Caso

Já são várias as refinarias que têm vindo a implementar unidades de recuperação de propileno.

A refinaria da Repsol na Corunha, Espanha, iniciou muito recentemente a construção de uma nova unidade de produção de propileno *polymer-grade* que melhorará a competitividade e eficiência do complexo industrial, um dos principais motores da economia galega. Para a realização deste projeto, a refinaria da Corunha está a investir 29 milhões de euros com o objetivo de aumentar em 35% a produção de propileno no complexo industrial e de o revalorizar com um aumento da sua qualidade de pureza, atingindo uma produção anual estimada em 81.000 toneladas de propileno *polymer-grade*. O período previsto para a execução da nova unidade é de 8 meses (La Voz de Galicia, 2020).

3.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados vários aspetos sobre o crescente mercado de propileno, sobre a refinação e foram abordadas soluções possíveis para maximizar e recuperar o propileno obtido no FCC da refinaria de Sines.

O propileno é produzido como subproduto da refinação de petróleo e o seu mercado está a crescer a uma taxa de 6% ao ano, um número bastante motivador que leva as refinarias a interessarem-se pelo setor petroquímico.

É possível maximizar a produção de propileno na unidade FCC através de várias abordagens. Se o catalisador que é incorporado no FCC de Sines for substituído por um que maximize propileno e ainda o aditivo que lhe é adicionado for incorporado em maiores concentrações é certo que o rendimento de propileno vai apresentar um crescimento significativo.

O aumento da temperatura é uma solução simples, rápida e com baixos custos de implementação, que também pode ser conjugada com as modificações no sistema catalítico. Já mudanças a nível de equipamento, como o *revamping* da Merox de GPL, apresentam investimentos maiores.

Sobre a recuperação de propileno *polymer-grade*, a Galp ainda não possui nenhuma unidade capaz de realizar esta conversão, pelo que terá de investir num sistema completamente novo para poder comercializar propileno de grau polimérico e poder alcançar lucros maiores do que o que tem vindo a praticar até agora com propileno *refinery-grade*.

De forma a ilustrar a realidade das soluções propostas, foram apresentados alguns casos de estudo de refinarias que já estão a implementar processos e tecnologias capazes de maximizar propileno.

Foram também apresentados alguns fornecedores da área e produtos comercializados por eles.

4 CENÁRIO ATUAL: CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE

4.1 RENDIMENTO EM PROPILENO

Para a maximização da produção de propileno é aconselhada a incorporação de ZIP entre 10 a 15%, muito superior à atualmente usada. Caso se atinja os 15% de aditivo no FCC a quantidade de ZSM-5 presente vai ser de 6%. Deste modo, e no âmbito da realização deste estudo, recorreu-se ao software Petro-SIM^{TM5} para simular os rendimentos que podem vir a obter-se na unidade FCC ao adicionar-se maiores quantidades de aditivo. Os resultados desta simulação estão apresentados no gráfico da Figura 17. Do gráfico, observa-se que o modelo reacional reage de forma positiva à adição de ZSM-5, apresentando um aumento de propileno de aproximadamente 2% em peso, para uma temperatura de reação constante, o que corresponde a uma taxa de crescimento de mais de 30%.

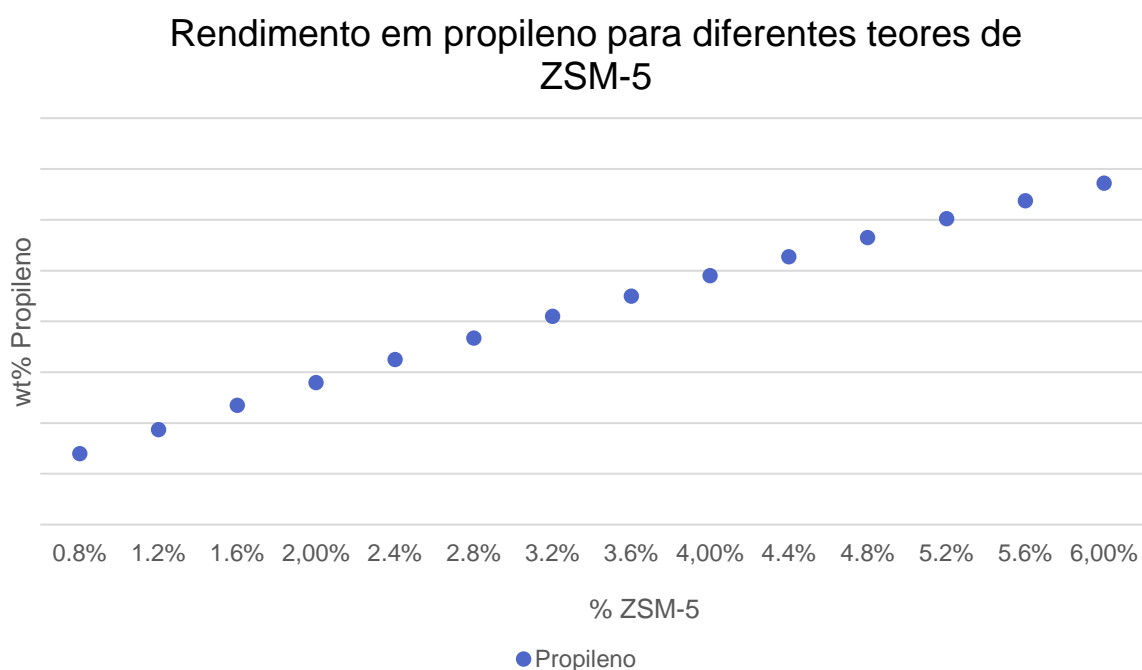


Figura 17 - Comportamento dos rendimentos em propileno em função da adição de ZSM-5

A temperatura de reação do FCC é outro dos fatores que interfere no rendimento em propileno. Atualmente a refinaria está a operar a uma temperatura média de 530°C/535°C. O aumento da temperatura nesta unidade é uma opção económica e imediata, que também foi testada neste software, e obteve resultados positivos, apresentados no gráfico da Figura 18. Observa-se que o modelo

⁵ Software da KBC, especialmente desenvolvido para simular processos petroquímicos, capaz de produzir resultados precisos e rigorosos.

reacional reage bem ao aumento da temperatura de reação, apresentado um acréscimo de aproximadamente 1% no rendimento em propileno, para a quantidade de ZSM-5 constante de 0,8%, traduzindo-se numa taxa de crescimento de mais de 15%.

Rendimento de propileno para diferentes temperaturas

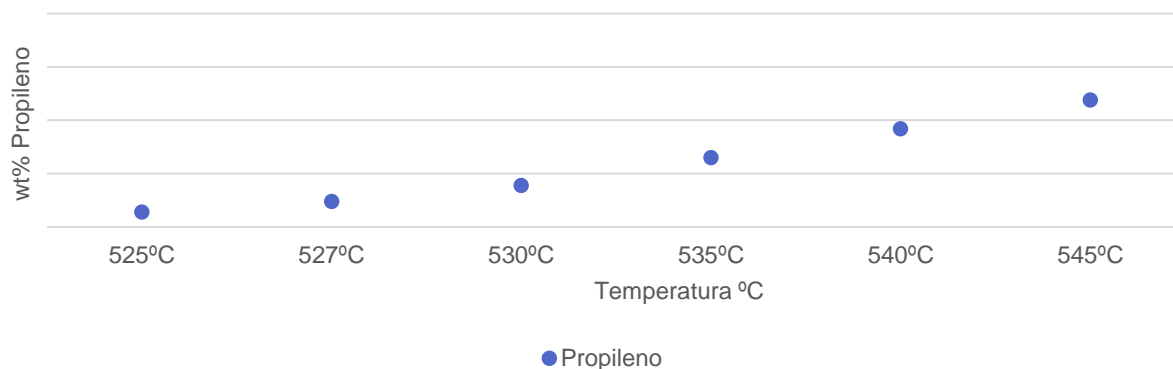


Figura 18 – Comportamento dos rendimentos em propileno em função do aumento de temperatura.

Fonte: Galp

Esta maximização de propileno irá obrigar a um *revamping* da capacidade na unidade mercox de GPL, uma vez que a unidade já está atualmente no seu limite processual, e possivelmente noutras unidades que serão descritas mais à frente neste estudo.

4.2 PROPILENO POLYMER-GRADE

Após a maximização de propileno no FCC é preciso purificá-lo. Quanto maior a pureza do propileno, maior é a sua valorização, e mais interessante e rentável se torna comercializá-lo.

A refinaria ainda não possui tecnologias capazes de produzir propileno *polymer-grade* e é neste sentido que surge a oportunidade de avaliar processos e instrumentos capazes de purificar o propileno obtido, e ainda analisar se estes rendimentos justificam o investimento em novas tecnologias.

Os preços por tonelada de propileno *refinery-grade* e *polymer-grade* estão representados no gráfico da Figura 19. Na Europa, a principal diferença entre estas duas qualidades de propileno é que a valorização tem em conta a pureza do produto. O cálculo do preço contabiliza as cotações mensais de cada produto e ainda um fator, normalmente entre 0,95 e 1, que depende das condições do mercado. Por simplificação, e como o gráfico é representativo, para obter os valores da Figura 19 foram assumidos fatores constantes ao longo dos meses, e iguais a fevereiro de 2020.

Para as condições descritas, o propileno *polymer-grade* é cerca de 25% mais valorizado que o *refinery-grade*, o que é bastante motivador e pode ser encarado como uma oportunidade para a refinaria investir na comercialização de propileno de elevada pureza e assim maximizar os seus lucros.

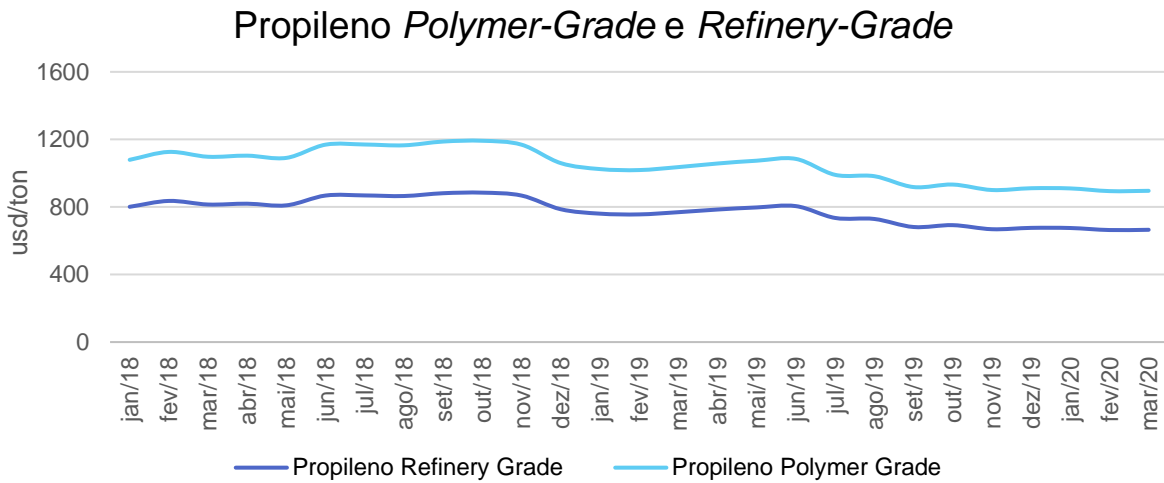


Figura 19 - Valorização de propileno *polymer-grade* e *refinery-grade*.

Fonte: Galp

Dadas as pressões competitivas e de custos que as refinarias enfrentam, as soluções para aumentar os lucros das empresas e reduzir as despesas são muito procuradas. A unidade FCC está entre as unidades de processo mais importantes das refinarias de petróleo, mas lida com um processo fisicamente complexo, difícil de operar e controlar. O reator, o regenerador e as principais secções da fracionadora são altamente sensíveis à dinâmica do processo e enfrentam algumas restrições. Estas unidades são obrigadas a funcionar em diferentes modos de operação, refletindo a evolução da economia, da procura no mercado, das restrições mecânicas e da matéria-prima das refinarias.

Na Figura 20 encontra-se representado um diagrama com as unidades envolvidas no processo de maximização de propileno.

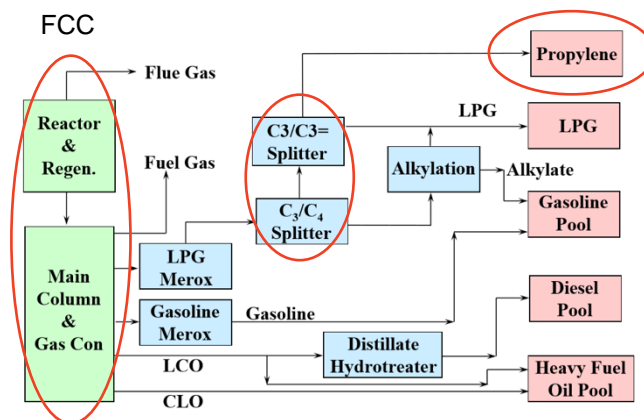


Figura 20 – Fluxograma do processo de produção de propileno, a partir do FCC.

Fonte: (UOP, 2015)

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Na unidade FCC da refinaria de Sines obtém-se atualmente 6,5% em peso de rendimento em propileno. As condições operacionais, o sistema de catalisador e reformulações e *upgrades* na tecnologia podem aumentar a produção de propileno até mais 5%. Atualmente está a ser adicionada apenas uma pequena % de ZIP e a unidade está a cerca de 535°C. Para a maximização de propileno será então preciso aumentar a quantidade de ZIP para 15% e a temperatura da reação para 545°C de forma a obter o máximo de propileno possível, que segundo as previsões do Petro-Sim™ serão de 9% em peso de propileno.

O propileno obtido no FCC é considerado *refinery-grade*, e para o transformar em *polymer-grade* (25% mais valorizado do que o *refinery-grade*) será necessário investimento pois a refinaria ainda não possui nenhum equipamento que permita a obtenção de propileno com esta pureza. Já existem novas tecnologias no mercado que, com base em reformulações e aplicações de novas unidades, permitem purificar o propileno e vendê-lo a um preço mais elevado, ao contrário do que é feito agora.

5 SIMULAÇÃO DA UNIDADE FCC

Os modelos de simulação são ferramentas essenciais para a otimização de unidades industriais e para a seleção de matérias-primas.

Para o estudo da unidade FCC da Refinaria de Sines, recorreu-se ao simulador de processos Petro-SIM™ da *KBC Advanced Technologies*, utilizado pela Galp. Este software foi desenvolvido para simulação de processos de refinação e petroquímicos e apresenta modelos reacionais base para várias unidades presentes numa refinaria. Permite simular e calibrar a unidade FCC de forma a prever rendimentos rigorosos face à qualidade da carga de alimentação e às condições operatórias que lhe são fornecidas. É um modelo calibrado onde estão representados não só o reator, mas também colunas de fracionamento, separadores e outros sistemas inerentes ao processo. O rigor é garantido através da monitorização periódica do funcionamento da unidade na refinaria, estudando os resultados e aferindo as diferenças em relação aos dados reais conhecidos.

Atualmente, as empresas de refinação utilizam modelos de otimização lineares para otimizarem de forma integrada a sua atividade. De modo a avaliar o impacto da introdução de novas unidades, alterações nos rendimentos ou matérias-primas, a Galp dispõe de um modelo matemático de programação linear (PL), o GRTMPS⁶ da Haverly Systems, representativo do aparelho refinador, que prevê resultados em relação a uma carga otimizada, tendo em conta mercados, custo de matérias primas e valorização dos produtos. Os resultados desta inovação refletem-se na margem otimizada de contribuição variável da refinação através da otimização da carga, dos rendimentos e da qualidade das unidades da refinaria.

Este modelo é alimentado não só de informação económica (preços e mercados) mas também com a caracterização das matérias-primas, especificação de produtos, restrições operatórias e informação processual (*performance* das unidades de produção, que é fornecida pelo modelo de simulação Petro-SIM). Representa uma ferramenta fundamental no apoio à decisão de forma transversal a toda a área de negócio. É utilizada na elaboração de orçamentos, escolha de matérias-primas, no planeamento mensal da produção das refinarias, no planeamento de paragens programadas, em diversas análises económicas (por exemplo *revampings* de unidades, estudos de reconfiguração, novas especificações de produtos, etc.), e no estudo de novos investimentos (novas unidades por exemplo).

Desta forma, as previsões de rendimentos obtidas pelo Petro-SIM™ serão usadas para alimentar o modelo de programação linear da Galp, e assim será possível obter estimativas de margens para diferentes cenários de preços futuros, apresentados nos subcapítulos seguintes.

⁶ Generalized Refining Transportation Marketing Planning System

5.1 CENÁRIOS DE PREÇOS

Para se avançar com o estudo económico de um investimento, é necessário calcular as margens de propileno possíveis obter quando se direciona o FCC para a maximização de propileno. Neste estudo foram utilizados quatro possíveis cenários de preços futuros no modelo de Programação Linear, definidos consoante a evolução da tecnologia e do consenso político, de forma a avaliar a resiliência do projeto. Estes cenários serão denominados por A, B, C e D, e estão descritos na Figura 21.

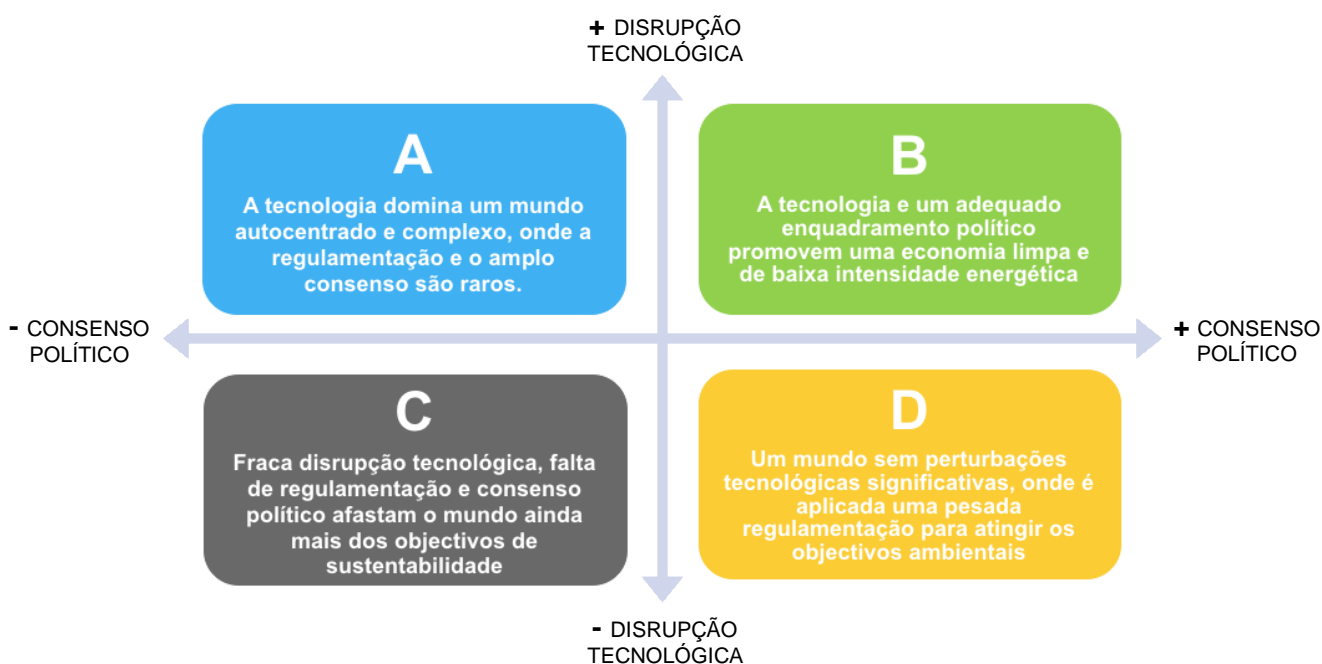


Figura 21 - Possíveis cenários de preços futuros da Galp

A procura dos transportes rodoviários na União Europeia irá diminuir com o aumento da eficiência e eletrificação. No cenário A, é expectável que a procura por veículos eléctricos aumente, o gasóleo mantenha os benefícios fiscais e que a ruptura tecnológica permita a penetração do hidrogénio (uma das maiores esperanças mundiais em termos energéticos). No cenário B, os veículos eléctricos serão o principal meio de transporte até 2040, os impostos sobre o gasóleo serão aumentados e a penetração de hidrogénio só irá acontecer após 2030. No cenário C, os ganhos de eficiência são baixos e a penetração de veículos eléctricos também será fraca, sem alteração nos impostos sobre combustíveis. Por fim, no cenário D o gasóleo terá impostos mais elevados e será utilizado quase exclusivamente para veículos pesados, os objetivos da diretiva sobre energias renováveis serão revistos, impulsionando os biocombustíveis. Na Figura 22 observa-se a evolução da procura dos transportes

rodoviários, em mtoe⁷, por tipos de combustível e para cada um dos cenários descritos anteriormente. Em todos os cenários considerados é observada uma taxa de crescimento anual negativa, o que significa que há sempre uma diminuição da procura por transportes rodoviários. O cenário B é o que apresenta a CAGR mais acentuada, deixando a gasolina praticamente de ser utilizada em transportes, seguida do cenário D, depois do cenário A e por fim o cenário C com uma taxa de crescimento de apenas -1,3% por ano.

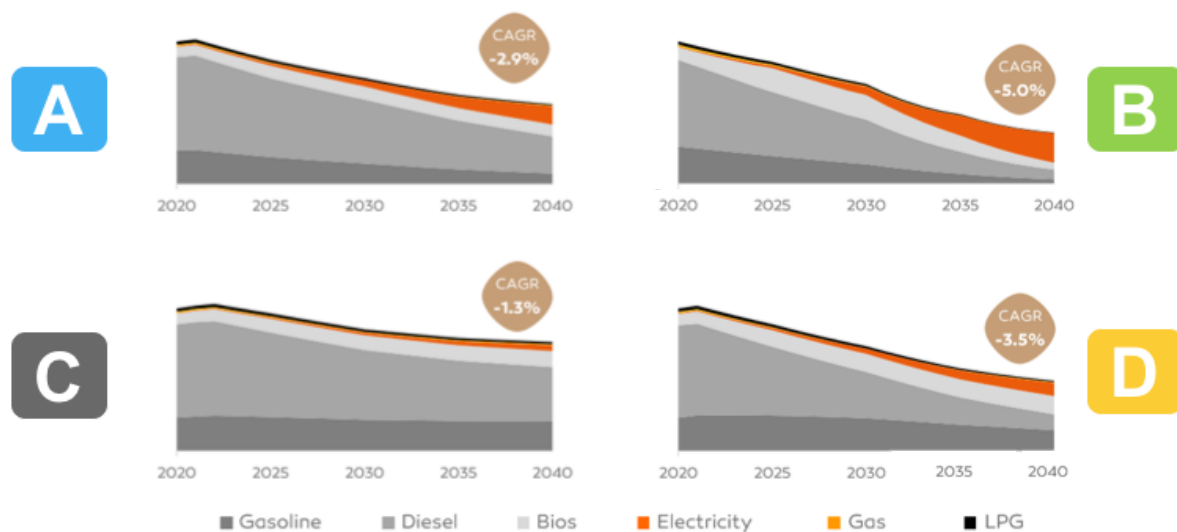


Figura 22 - Evolução da procura de transporte rodoviário da EU, em mtoe, até 2040, por cenário
 Fonte: (Galp, 2020e)

As perspetivas do preço do *brent* a longo prazo para cada um dos cenários (Figura 23) será naturalmente diferente, conforme o comportamento do mercado. A elevada procura de *crude* suporta o elevado preço do *brent* do cenário C. Apesar de ter um menor consumo de petróleo, o preço do cenário D é suportado por elevadas restrições na produção. O preço do Cenário A é principalmente impulsionado pela procura moderada de petróleo e por baixas restrições na produção. O Cenário B apresenta o preço mais baixo do *brent* devido à baixa procura de petróleo e às elevadas restrições de abastecimento.

⁷ Milhões de toneladas equivalentes de petróleo. Unidade de energia definida como o calor libertado na combustão de um milhão de toneladas de petróleo cru. Usa-se para expressar grandes quantidades de energia.

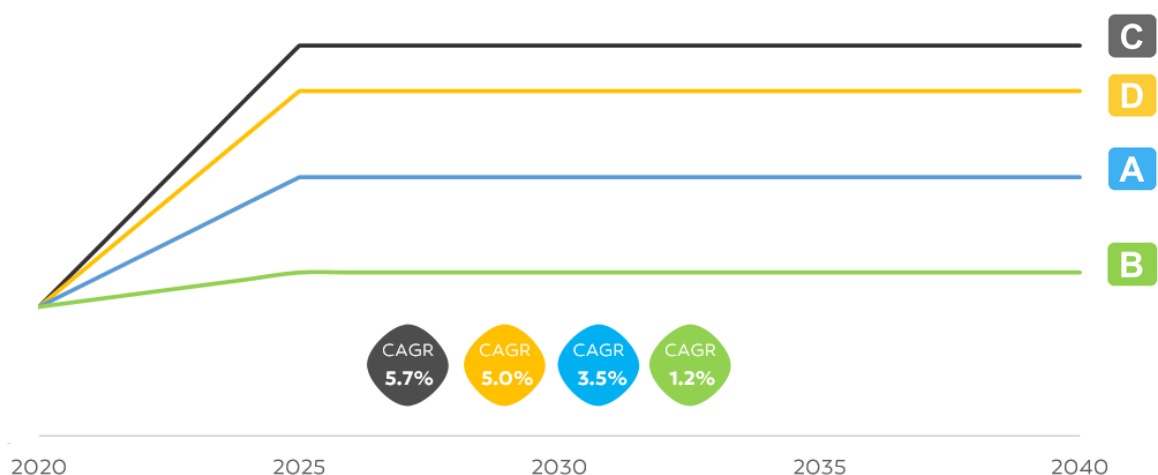


Figura 23 - Preços do Brent a longo prazo, por cenário

Fonte: (Galp, 2020e)

5.2 ANÁLISE DE PREÇOS: Propileno VS Gasolina

Foram avaliados, para os 4 cenários, os preços do propileno e da gasolina para os anos de 2025 e 2030 (Tabela 1). Apenas faz sentido investir na maximização de propileno quando este está mais valorizado do que a gasolina. No cenário C, quer em 2025 quer em 2030 a gasolina está mais valorizada do que o propileno e por isso o cenário não é favorável à produção de propileno em detrimento da gasolina e não se justifica investir em propileno. No cenário D, a gasolina de *cracking* e o propileno têm preços muito próximos, pelo que só irá ser feita a análise dos rendimentos nas condições dos cenários A e B, pois são os cenários com futuros promissores para a exploração de propileno.

Tabela 1 - Preços do Propileno e Gasolina para os diferentes cenários

	A	B	C	D	A	B	C	D
Preço de Exportação \$/t	2025				2030			
Δ C3 vs GA Cracking	112	233	-42	44	116	225	-25	41

Os preços considerados no cálculo dos deltas são preços de exportação (preços *spot*). No caso de se avançar com o investimento no sentido de aumentar o rendimento em propileno, terão que ser feitos contratos de fornecimento a empresas ou a *traders*, e as margens serão ainda maiores, pois os preços de contrato são geralmente superiores aos preços *spot*.

5.3 MARGENS DE REFINAÇÃO

Com recurso ao modelo PL obtiveram-se as margens de propileno para os cenários A e B, para 2025 e 2030, perante dois modos de funcionamento da refinaria de Sines: sem qualquer mudança ou investimento (a funcionar exatamente como está atualmente - *as is*) e com o FCC a maximizar o rendimento em propileno. Na Tabela 2 estão os deltas das margens obtidas, de forma a compreender qual o ganho anual, em milhões de dólares por ano, ao investir em maxi-propileno. Estas margens são relativas somente à refinação, ainda não contam com investimento (*capex*).

Tabela 2 - Margens de Refinação de Propileno em M\$/y, obtidas pelo PL

	2025		2030	
Δ Margens M\$/y	A	B	A	B
Δ Maxi Propileno	8.18	19.46	6.13	21.49

Convertendo estes valores em euros, considerando que 1\$ vale 0.86€, concluímos que no cenário A o delta da margem anual que se obtém é de cerca de 7.03M€ em 2025 e 5.27M€ em 2030. Para o cenário B, em 2025 o incremento na margem será de 16.74M€ por ano e em 2030 chegará aos 18.48M€.

Com as margens de refinação e os preços do propileno e da gasolina é possível construir uma reta que estabelece a correlação do delta margens de maximização de propileno e o delta de preços do propileno e gasolina. Esta reta está representada na Figura 24. O coeficiente de correlação R^2 é muito próximo de 1, o que mostra como a variância do delta margem de maxi-propileno é explicado pelo delta da diferença do preço do propileno e da gasolina.

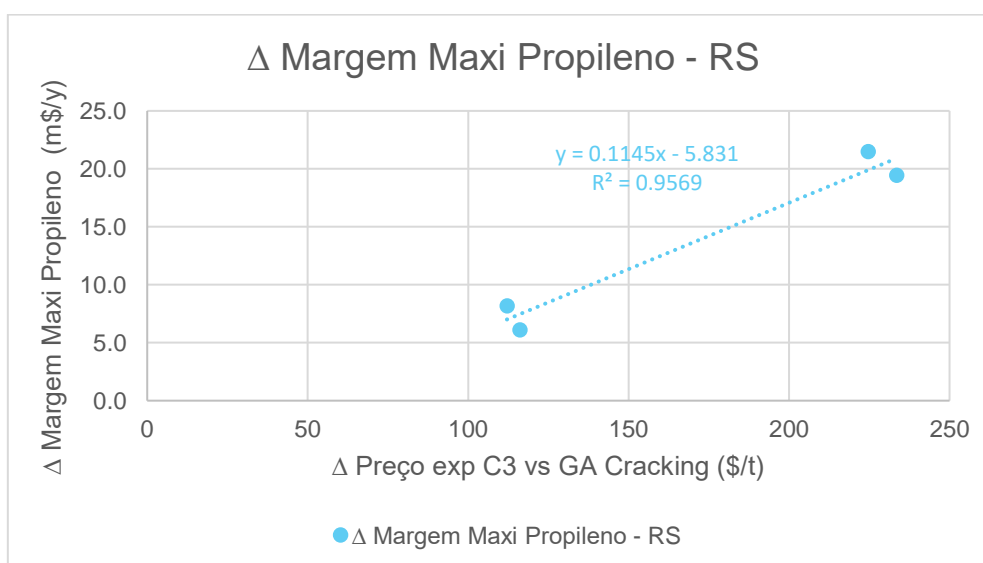


Figura 24 – Correlação Margem PL vs Preço Exp. Propileno – GA Cracking

Para estudar o Maxi-Propileno tiveram que se alterar as condições operatórias na simulação da unidade FCC. Foi necessário retirar o limite de alguns caudais que já estavam a funcionar no seu máximo. Da Tabela 3 podemos perceber que o caudal de *Fuel Gas*, o caudal de GPL e o caudal *gas compressor* excedem os seus limites atuais, e por isso precisarão de um *revamping*. A temperatura foi também aumentada dos 536°C para os 545°C e a quantidade de aditivo ZIP adicionado foi alterado para 15% (que perfaz os 6% de ZSM-5). O andamento do FCC passou a ser praticamente 100% em todos os cenários.

Tabela 3 - Condições Operatórias da Unidade FCC para maxi-propileno

Cenário	A		B		A		B	
Ano	2025				2030			
Maxi-Propileno	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Δ Carga (ton/d)	1101		278		919		908	
% Andamento	82%	100%	93%	97%	85%	100%	85%	100%
T _{rx} (°C)	536	545	536	545	536	545	536	545
Δ Caudal FGS (máx 0.4kt/d)	0.12		0.09		0.1		0.12	
Δ Caudal GPL (máx 1.09 kt/d)	0.5		0.46		0.5		0.57	
Δ Caudal Gas Compressor (máx 73.7 kt/d)	21		28.2		19.9		28.6	

Na Tabela 4 estão os deltas dos rendimentos obtidos para todos os subprodutos do FCC. Em média, o propileno aumenta o seu rendimento em cerca de 3-4%, o que é um resultado bastante positivo que representa quase mais 82 mil toneladas de propileno produzidas por ano que são traduzidas em 81 mil toneladas exportadas para o cenário A em 2025, e 86 mil toneladas de propileno/ano que se traduzem em 85 mil toneladas exportadas, para o cenário B do mesmo ano. Em 2030, para o cenário A temos uma produção de quase 84 mil toneladas com 83 mil toneladas exportadas e para 2030, 100 mil toneladas produzidas e 99 mil exportadas, por ano.

Tabela 4 - Delta Rendimentos para o Maxi-Propileno

Cenário	A	B	A	B
Ano	2025		2030	
FCC - Delta Rendimentos (%m)				
FGS	0.8	1.1	0.6	1.1
Propileno	2.6	3.8	2.9	3.6
Butileno	2.5	3.3	3.0	3.1
Nafta Leve	0.3	0.6	0.7	0.4
Nafta Pesada	-4.1	-4.7	-2.8	-5.3
Swing-cut	-2.0	-2.0	-4.7	-0.9
LCO	0.4	-0.9	2.2	-1.6
Slurry	-0.9	-2.0	-2.3	-1.3
Coque	0.5	0.8	0.5	0.8
Δ Propileno - ton/ano	81913	86074	83743	100173
Δ Exportações - ton/ano	81293	84936	82694	99317

Este propileno é *refinery-grade* e exige alguns investimentos nos caudais mencionados anteriormente. Para a produção de propileno *polymer-grade* será necessário um investimento superior num *splitter* de C3. No capítulo seguinte será feita a avaliação económica tendo em conta as margens obtidas pelo PL e as informações facultadas pelos fornecedores da GALP, quando consultados sobre a necessidade de aumentar a capacidade da unidade FCC para maximizar a produção de propileno.

5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Foram apresentados 4 possíveis cenários de preços dos quais apenas 2 são favoráveis à maximização de propileno, por estar mais valorizado do que a gasolina. Para os 2 cenários estudados foram calculados os rendimentos e as margens de propileno possíveis de obter com as devidas alterações no FCC. Para o cenário A é possível obter-se cerca de 3% mais propileno por ano do que o produzido atualmente, e no cenário B praticamente mais 4% em peso da carga do FCC, que se traduz num incremento de 80 a 100 mil toneladas exportadas por ano em ambos os cenários. No cenário A o propileno vale mais 25% do que a gasolina, e desta forma a margem de propileno que se consegue ganhar encontra-se entre os 6 e 8 milhões de dólares por ano. No cenário B, o propileno está valorizado em quase o dobro do que a gasolina e por isso conseguem-se margens de propileno entre os 19 e os 22 milhões de dólares por ano. Estas margens não têm ainda em conta qualquer tipo de investimento em capacidade ou tecnologias. Para se conseguir de facto chegar a estes números será necessário aumentar a capacidade de alguns caudais do FCC, processo este que exigirá investimento.

6 AVALIAÇÃO ECONÓMICA

Um estudo de viabilidade económica e financeira é fundamental para avaliar o valor de um eventual projeto de investimento a realizar e qual o seu impacto na empresa. A implementação de um projeto de investimento, implica uma profunda análise de mercado, da empresa, do produto e de um rigoroso plano de negócios, que suporte a viabilidade do investimento.

Ao contactar com os licenciadores e fornecedores da refinaria de Sines, e com o apoio do departamento de Engenharia e Gestão de Projetos da Galp, foi elaborado um estudo que visa estimar os custos e os investimentos necessários para a maximização e purificação de propileno na refinaria.

6.1 ESTIMATIVA DO CAPEX PARA MAXI-PROPILENO NO FCC

Um dos aspetos mais importantes para determinar a viabilidade económica global de um processo químico é determinar o custo de capital. Para além do preço de compra do equipamento, os custos de capital incluem a entrega e instalação do equipamento, a preparação do terreno para a construção, os salários dos empreiteiros e dos trabalhadores da construção, e quaisquer outros custos associados à construção de uma instalação industrial química.

É necessário ter em conta que existem vários *bottlenecks* conhecidos, e provavelmente alguns ainda desconhecidos também, aquando do cálculo do *capex*. Depois de consultadas as equipas responsáveis pela operação da refinaria e também a BASF, confirmou-se que há limitações em várias alturas do processo, como no reator, na fracionadora principal, no compressor de gás húmido, nas correntes de derivados leves, na merox de GPL, na unidade de aminas, na unidade de alquilação entre outros.

Para esta estimativa, o cálculo foi subdividido em algumas etapas:

- **Custos ISBL (*Inside Battery Limits*)** - considerados os custos internos da fábrica, o seu cálculo compreende custos de aquisição e instalação de equipamentos, onde foram introduzidos os custos com tubagens, *revampings* das capacidades das unidades mencionadas acima (merox, aminas, caudais, etc), catalisadores, instrumentação, construção, custos diretos de campo (equipa de construção, instalações temporárias, andaimes, ...) e custos indiretos de campo.
- **Custos OSBL (*Outside Battery Limits*)** – são os custos associados a desenvolvimentos fora do local, que permitem que a fábrica trabalhe, mas que não estão diretamente associados a elementos entre a alimentação e a produção da instalação química, como iluminação, segurança, estradas, entre muitos outros.

- **Contingência do projeto** - custos que possam surgir ao longo da evolução do projeto, possíveis flutuações dos preços de materiais e mão-de-obra, especificações incorretas de equipamentos, inflação, atrasos e outros imprevistos.

Depois de apurados e estimados todos estes custos, conclui-se que será necessário um investimento de cerca de 50 milhões de euros para capacitar a refinaria para a produção e maximização de propileno na unidade FCC. Este valor foi calculado com um intervalo de exatidão entre os -20% e os 35%.

6.1.1 Tempo de Retorno do Investimento

O tempo de retorno do investimento, (*payback*) é um indicador de *performance* financeiro, muito utilizado nas empresas para análise do prazo de retorno do investimento num projeto.

Normalmente este período é medido em meses ou anos, da seguinte forma:

$$\text{Tempo de Retorno} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Ganho Anual}}$$

Por simplificação, considerou-se que o ganho anual serão o valor mínimo entre as margens de Maxi-Propileno de 2025 e 2030.

Para o cenário A:

$$\text{Tempo de Retorno Cenário A} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Ganho Anual}} = \frac{50M\text{€}}{5.3M\text{€/ano}} = 9.4 \text{ anos} \sim 9 \text{ anos e } 5 \text{ meses}$$

Para o cenário B:

$$\text{Tempo de Retorno Cenário B} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Ganho Anual}} = \frac{50M\text{€}}{16.7M\text{€/ano}} = 3 \text{ anos}$$

Para um investimento de 50 milhões de euros, e com os ganhos anuais considerados para cada cenário, o tempo de retorno do cenário A é de aproximadamente 9 anos e do cenário B 3 anos, representando um retorno muito mais imediato e interessante quando comparado com o cenário A.

6.2 PROPILENO POLYMER-GRADE

Para além da maximização dos rendimentos em propileno será interessante analisar a possibilidade de o purificar, conseguindo desta forma margens maiores, porque quanto mais puro for um produto maior valor terá.

A instalação de um *splitter* de C₃= mostra que o objetivo de aumentar o grau polimérico de propileno é fácil de atingir, no entanto representa um investimento inicial muito grande.

Existem variáveis no processo que afetam as dimensões do equipamento e os custos operacionais. Como todos os sistemas de fracionamento, para uma determinada separação, o número de andares da coluna necessários é inversamente proporcional ao número necessário de *reboilers*, condensadores e diâmetros das torres. O preço varia conforme o número de pratos, a carga, e muitos mais fatores.

Até ao momento da elaboração deste documento, não foi possível obter uma estimativa exata do investimento num *splitter* para a capacidade da refinaria de Sines, por isso foi assumido o valor de 29 milhões de euros, o valor do caso estudado na secção 3.5.3 da revisão bibliográfica, que diz respeito a uma unidade com condições e cargas semelhantes às de Sines. Desta forma, e considerando que o propileno *polymer-grade* está cerca de 25% mais valorizado que o *refinery-grade*, pode avaliar-se a rentabilidade deste investimento adicional.

A eficiência de um *splitter* varia com fatores como a pressão, o diâmetro dos buracos dos pratos, a quantidade de pratos, entre muitos outros. Por simplificação, será considerado para o estudo um *splitter* com um rendimento de 85% (Kolmetz, 2020).

De acordo com as quantidades de maxi-propileno produzidas em cada cenário, foi estimada a margem que seria possível obter ao produzir propileno *polymer-grade* (ver Tabela 5).

Tabela 5 – Valorização das margens de propileno para cada cenário, com utilização do *splitter*

Δ Margens M€/y	2025		2030	
	A	B	A	B
Δ Propileno <i>Refinery-Grade</i>	7.27	16.74	5.27	18.48
Δ Propileno <i>Polymer-Grade</i>	7.47	17.78	5.60	19.63

6.2.1 Tempo de Retorno do Investimento em Propileno *Polymer-Grade*

Tendo em conta os mesmos pressupostos usados para o cálculo do tempo de retorno na secção 6.1.1, e considerando que ao investimento de 50 milhões de euros teriam de ser adicionados 29 milhões de euros relativos ao *splitter*, totalizando 79 milhões de euros, obtêm-se os seguintes valores:

Cenário A

$$\text{Tempo de Retorno Cenário A} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Ganho Anual}} = \frac{79M\text{€}}{5.6M\text{€/ano}} = 14.1 \text{ anos} \sim 14 \text{ anos e 1 mês}$$

Cenário B

$$\text{Tempo de Retorno Cenário B} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Ganho Anual}} = \frac{79M\text{€}}{17.8M\text{€/ano}} = 4.4 \text{ anos} \sim 4 \text{ anos e 5 meses}$$

Para um investimento de 79 milhões de euros, e com os ganhos anuais considerados para cada cenário, o tempo de retorno do cenário A é de aproximadamente 14 anos e do cenário B aproximadamente 4 anos, representando um retorno muito mais imediato e interessante quando comparado com o cenário A.

6.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Foram avaliados dois investimentos distintos: um para a maximização do rendimento em propileno na unidade FCC (propileno *refinery-grade*), e um posterior investimento na recuperação deste propileno através de um *splitter* (propileno *polymer-grade*).

Para o primeiro caso, os *paybacks* são de 9 anos para o cenário A e 3 anos para o cenário B. Para a obtenção de propileno *polymer-grade* os *paybacks* são de 14 anos para o cenário A e 4 anos para o cenário B. Destes resultados podemos concluir que o cenário A tem tempos de retorno um pouco extensos para o pretendido, enquanto no cenário B recupera-se o investimento num espaço de tempo mais interessante. Porém, caso se opte por avançar com a produção de propileno *polymer-grade*, terão que ser realizados contratos, o que permite alcançar margens superiores às aqui apresentadas.

O mercado para *refinery-grade* e para *polymer-grade* será certamente diferente, sendo este último mais valorizado e provavelmente mais procurado, por já ser mais puro e não carecer de tratamento.

Há certamente mais custos operacionais e de manutenção a ter em conta aquando a avaliação mais profunda deste investimento, que não foram contabilizados neste estudo.

7 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Nesta Dissertação de Mestrado foi realizado um estudo sobre a integração das atividades de refinação e petroquímica, na refinaria de Sines, pertencente ao grupo Galp.

As refinarias em mercados maduros estão a rever os seus modelos de negócio e opções tecnológicas em resposta ao abrandamento da procura de combustíveis e ao forte crescimento contínuo da procura petroquímica global. A médio prazo espera-se uma forte procura de C3= por parte da indústria petroquímica da região EMEA (Europa, Médio Oriente e África).

A estratégia mais seletiva para aumentar o rendimento em C3= no FCC da GALP é utilizando uma combinação da temperatura do reator e aditivos baseados em ZSM-5. Neste estudo foram calculadas as margens de propileno que são possíveis obter assumindo que se mantém o aditivo ZIP, mas em maiores concentrações (15%) e com a temperatura do reator a 545°C em vez de 536°C.

Foram apresentados quatro possíveis cenários de preços futuros (preços do propileno e da gasolina) definidos consoante a evolução da tecnologia e do consenso político, tendo sido apenas estudados os cenários A e B, por serem os que valorizam mais o propileno face à gasolina. O cenário A é caracterizado por uma procura crescente de veículos elétricos, embora o gasóleo mantenha os seus benefícios fiscais, enquanto que no cenário B os veículos elétricos serão o principal meio de transporte e o enquadramento político irá promover uma economia limpa e de baixa intensidade energética.

Atualmente, o rendimento em propileno do FCC da Galp é de 6%wt. O objetivo preliminar foi obter um maior rendimento em propileno, apenas com algumas modificações aos limites dos caudais da unidade e pouco mais. Para os cenários analisados, observa-se que o propileno aumenta o seu rendimento em cerca de 3-4%, o que é um resultado bastante positivo e de encontro com o esperado.

Após a maximização de propileno foi ainda estudada a hipótese de conversão em propileno com elevado grau de pureza, com recurso a um *splitter* de C3, de forma a tornar a refinaria capaz de produzir propileno de alta qualidade e aumentar assim as suas receitas.

O investimento necessário para a maximização de propileno no FCC é de 50 M€ e o investimento considerado para o *splitter* será de 29 M€, totalizando 79 M€. O *payback* no cenário B é bastante mais motivador do que no cenário A, variando entre 3 a 4 anos (B) e 9 a 14 anos (A), dependendo do tipo de investimento que se faça - se apenas em maxi-propileno ou se contemplando também a recuperação de propileno *polymer-grade*.

A avaliação económica mostrou o potencial deste projeto prevendo um incremento na margem bruta de propileno e comprovando a pertinência técnica do estudo.

No decorrer da realização deste trabalho foram descontinuadas as operações de refinação em Matosinhos, e, embora se tenha que cumprir o mercado interno (nacional) somente com a refinaria de Sines, esta ação em nada impacta este estudo. A produção de propileno apenas acontece na Refinaria de Sines (unidade FCC) e o propileno que dela resulta é exportado na sua totalidade, logo não existe obrigação de cumprir nenhum mercado fixo.

Como trabalho futuro, a Galp irá avançar com um *feasibility study*, contratando uma empresa especializada que visa perceber em detalhe a viabilidade do projeto. Desse estudo sairá uma análise completa dos investimentos possíveis, permitindo uma avaliação mais rigorosa e, posteriormente, uma decisão mais clara para a sua implementação futura. Os 4 cenários propostos e analisados neste trabalho estabelecem casos limite do contexto em que um eventual projeto se poderá vir a desenvolver. A utilidade deste estudo e o seu uso futuro poderá ser a dois níveis. Por um lado, permitindo acompanhar o desenrolar do estudo de viabilidade contratado a terceiros, pelas possibilidades de *benchmark*. Por outro, pelas eventuais alterações de conjuntura que possam acontecer durante a execução ou após a entrega do estudo de viabilidade já se encontrarem previstas no espaço de cenários apresentados, torna-se possível a comparação e a utilização qualitativa das conclusões para uma eventual análise em conjunto com o estudo realizado externamente.

Nota final

Este projeto foi desenvolvido com base num estágio de 5 meses na empresa Galp Energia, iniciado em março de 2020. Devido à situação pandémica teve que ser readaptado, resultando assim este relatório que integra os melhores resultados obtidos face às barreiras impostas pela pandemia e ao desafiante tema abordado.

REFERÊNCIAS

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2008). *Licença Ambiental - Refinaria de Sines*.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2019). *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050*. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2020). *Domínios ambientais - Transportes*. Obtido em 11 de Março de 2020, de Relatório do Estado do Ambiente:
https://rea.apambiente.pt/dominio_ambiental/transportes
- Almeida, M., Lau, L., Bugueta, P., Santos, L., Castro, R., Silva, L., & Santo, I. (2013). *Aditivo para catalisadores de processo de craqueamento catalítico fluido*. Escavador.
- Axens. (2020). *Petroriser*. Obtido de Axens: <https://www.axens.net/product/process-licensing/20044/petroriser.html>
- Baptista, A. (2011). *Os vários tipos de petróleo*. Obtido de Dinheiro Vivo:
<https://www.dinheirovivo.pt/economia/os-varios-tipos-de-petroleo/>
- BASF. (2015). *ZIP Olefins Additive*. BASF.
- BASF. (2020). *BASF introduces ZEAL™ Fluidized Catalytic Cracking (FCC) additive to deliver more propylene for refiners*. Obtido em 25 de Maio de 2020, de BASF:
<https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2020/05/p-20-204.html>
- BBC. (2007). Oil markets explained. *BBC*. Obtido em 28 de Abril de 2020, de
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/904748.stm>
- BloombergNEF. (2020). *Electric Vehicle Outlook 2020*.
- Bona, F. d. (2019). *Simulação processual da unidade Hydrocracker e Fluid Catalytic Cracker com resultados em Ambiente de Business Intelligence*.
- Castaño, D., Fonseca, A., Lains, P., & Marcos, D. (2017). *Os Petróleos em Portugal: do Estado à privatização 1937-2012* (1 ed.). (Imprensa de Ciências Sociais, Ed.)
- Costa, A., Cerqueira, H., Ferreira, J., Ruiz, N., & Menezes, S. (2007). BEA and MOR as additives for light olefins production. *Applied Catalysis A: General*, 319, 137-143.
- Couch, K. A., Glavin, J. P., Wegerer, D. A., & Qafisheh, J. A. (2007). *FCC Propylene Production*. UOP.

- Einsfeldt, M. (2006). *Dinâmica e estabilidade de um conversor de craqueamento catalítico de resíduo*. Rio de Janeiro: COPPE.
- Farracho, M. C. (Novembro de 2018). Simulação processual e otimização conjunta das unidades.
- Fontana, M. (2018). *AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE UMA TORRE DE DESTILAÇÃO DE PROPENO*.
- Fortune Business Insights. (Outubro de 2019). *Polypropylene market*. Obtido em 10 de Março de 2020, de Fortune Business Insights: <https://www.fortunebusinessinsights.com/press-release/polypropylene-pp-market-9320>
- Freitas, O. (2019). *Refinação em Portugal: as refinarias do Porto e de Sines*. Obtido em 26 de Março de 2020, de Mineralex: <https://www.mineralex.net/refinacao-em-portugal-as-refinarias-do-porto-e-de-sines/>
- Galp. (2010). *Manual introdutório da unidade de Fluid Catalytic Cracking (FCC) - Rev 01*.
- Galp. (2015a). *Energia cria futuro - Relatório de Sustentabilidade 2015*.
- Galp. (2015b). *Sines Refinery - Safety, Health and Environment Performance 2015*.
- Galp. (2020a). *Refinação e Distribuição: Aprovisionamento, refinação e logística*. Obtido em 20 de Abril de 2020, de Galp: <https://www.galp.com/corp/pt/sobre-nos/o-que-fazemos/refinacao-distribuicao/aprovisionamento-refinacao-e-logistica>
- Galp. (2020b). *A Galp*. Obtido em 18 de Maio de 2020, de Galp: <https://www.galp.com/corp/pt/sobre-nos/a-galp>
- Galp. (2020c). *Organização*. Obtido em 20 de Abril de 2020, de Galp: <https://www.galp.com/corp/pt/sobre-nos/a-galp/organizacao>
- Galp. (2020d). *Fundamentos da refinação*. Obtido em 26 de Março de 2020, de Galp: <https://www.galp.com/corp/pt/sobre-nos/os-nossos-negocios/refinacao-e-distribuicao/aprovisionamento-refinacao-e-logistica/fundamentos-de-refinacao>
- Galp. (2020e). *Galp Refinery Scenarios*.
- Galp. (2021a). *Refinação e Logística*. Obtido em Outubro de 2021, de <https://www.galp.com/corp/pt/sobre-nos/o-que-fazemos/industrial-energy-management/refinacao-e-logistica>
- Galp Energia. (2013). *Refinaria de Sines - Data Book de Segurança, Saúde e Ambiente 2013*.

- GRACE. (2014). *Protagon Sheet*. Obtido em 25 de Maio de 2020, de GRACE:
<https://grace.com/catalysts-and-fuels/en-us/fcc-catalysts/ProtAgon>
- GRACE. (2019). Catalyst and Additive Technology for Increased FCCU Propylene Yields. Obtido de GRACE: <https://grace.com/catalysts-and-fuels/en-us/fcc-additives/LPG-Olefins>
- Gupta, S., & Xu, D. (2019). Business Trends: Crude-to-chemicals—An opportunity or threat? *Hydrocarbon Processing*, 50-65.
- ICIS. (2010). *Propylene uses and market data*. Obtido em 15 de Maio de 2020, de ICIS:
<https://www.icis.com/explore/resources/news/2007/11/06/9076455/propylene-uses-and-market-data/>
- IHS Markit. (2019). *IHS Markit's Chemical Economics Handbook -Propylene*. Obtido em 19 de Março de 2020, de IHS Markit: <https://ihsmarkit.com/products/propylene-chemical-economics-handbook.html>
- Intratec. (2013). *Technology Economics: Propylene via Propane Dehydrogenation, Part 3*.
- Johnson Matthey. (2018). *INTERCAT FCC additives and catalyst handling technologies*. Obtido de <https://matthey.com/-/media/files/markets/oil-and-gas/intercat-fcc-additives-and-catalyst-handling-technologies-web.pdf>
- Jones, T., Dunwoodie, M., Boucher-Ferte, V., & Reiff, O. (2011). *Chemicals for beginners*. Londres: Global Markets Research.
- Knight, J., & Mehlberg, R. (2011). *Maximize Propylene from FCC Unit*. UOP.
- Kolmetz, K. (2020). *Propylene C3 Splitter Tower Efficiency*. KLM Technology Group.
- La Voz de Galicia. (2020). *Sociedad*. Obtido em 31 de Maio de 2020, de La Voz de Galicia:
<https://www.lavozdegalicia.es/noticia/sociedad/2020/05/19/refineria-invierte-29-millones-euros-construir-unidad-mejora-produccion-propileno/00031589899937363817522.htm>
- Látka, R., Oleríny, V., Kováč, N., & Ventham, T. (2016). *Increasing FCC Propylene Yield*. Digital Refining.
- Leblanc, R. (2019). *An overview of polypropylene recycling*. Obtido de The balance small business: thebalancesmb.com/an-overview-of-polypropylene-recycling-2877863
- Palmer, E., Glasgow, I., Nijhawan, S., Clark, D., & Guzman, L. (2012). *High-purity propylene from refinery LPG*. Digital Refining.

- Penna, E. M. (2012). *Estudo Do Aumento Da Produção De Propeno Em Uma Unidade De FCC*. Rio de Janeiro.
- (2018). *Polypropylene Market by Type*. Markets and Markets. Obtido de https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polypropylene-market-64103589.html?gclid=Cj0KCQjw9ZzzBRCKARIsANwXaeL8XIQAkCYREGbGjZIW6UiJJ2DbR5MFtIn6Fgsu4uV4DNExoY87jDkaAi6LEALw_wcB
- Rogers, T. (2014). *All you need to know about polypropylene*. Obtido em 1 de Abril de 2020, de Creative Mechanisms: <https://www.creativemechanisms.com/blog/all-you-need-to-know-about-polypropylene.-part-2>
- TechSci. (2017). *Global Propylene Market by Application, by Region, Competition Forecast and Opportunities, 2011 - 2025: TechSci Research Report*.
- UOP. (2015). *Introduction to UOP FCC Process Technology*.
- UOP. (2018). *UOP RFCC Resid FCC Process*. Obtido em 20 de Janeiro de 2021, de <https://www.uop.com/fcc/>
- UOP. (2020). *UOP Propylene Recovery System*.
- Wood Mackenzie. (2018). *Propylene Global Supply Demand Analytics Service*. Obtido em 1 de Abril de 2020, de Wood Mackenzie: <https://www.woodmac.com/news/editorial/propylene-global-supply-demand-analytics-service/>
- Zygula, T. M., & Kolmetz, K. (2011). *Design Guidelines For Propylene Splitters*.

ANEXOS

ANEXO 1 – ESQUEMA DA REFINARIA DE SINES

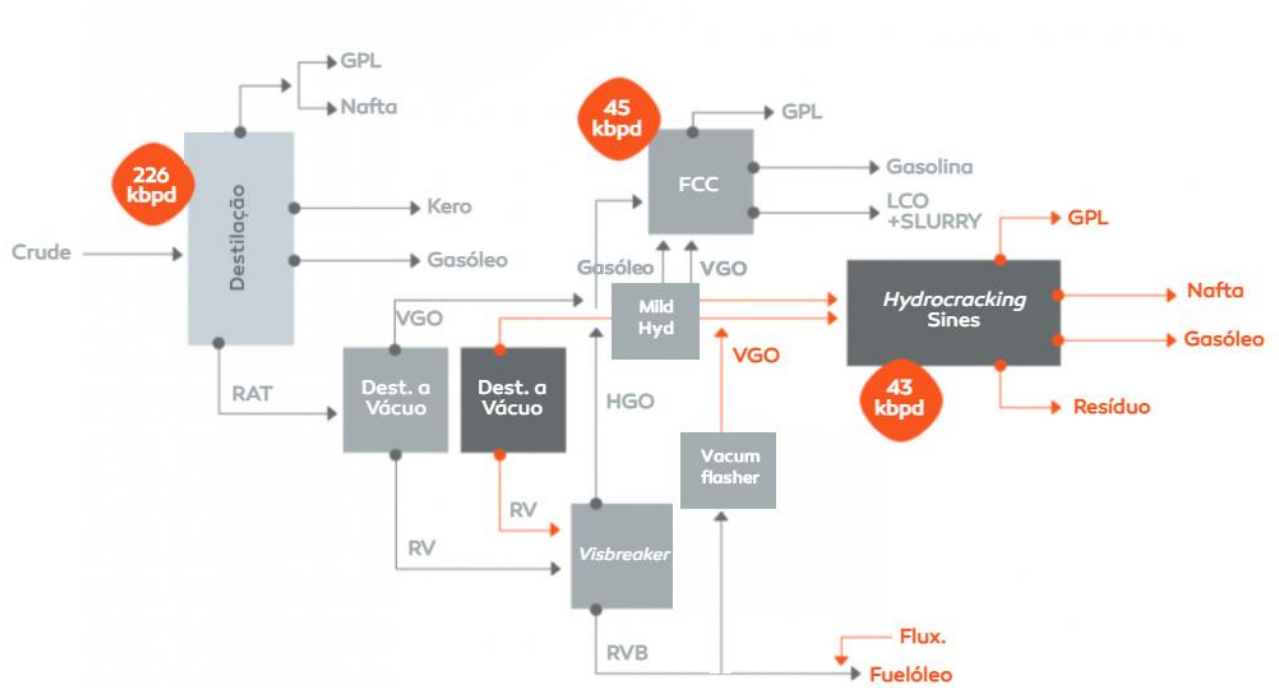


Figura A1.1 – Esquema simples do complexo refinador GALP

Fonte: (Galp, 2021a)

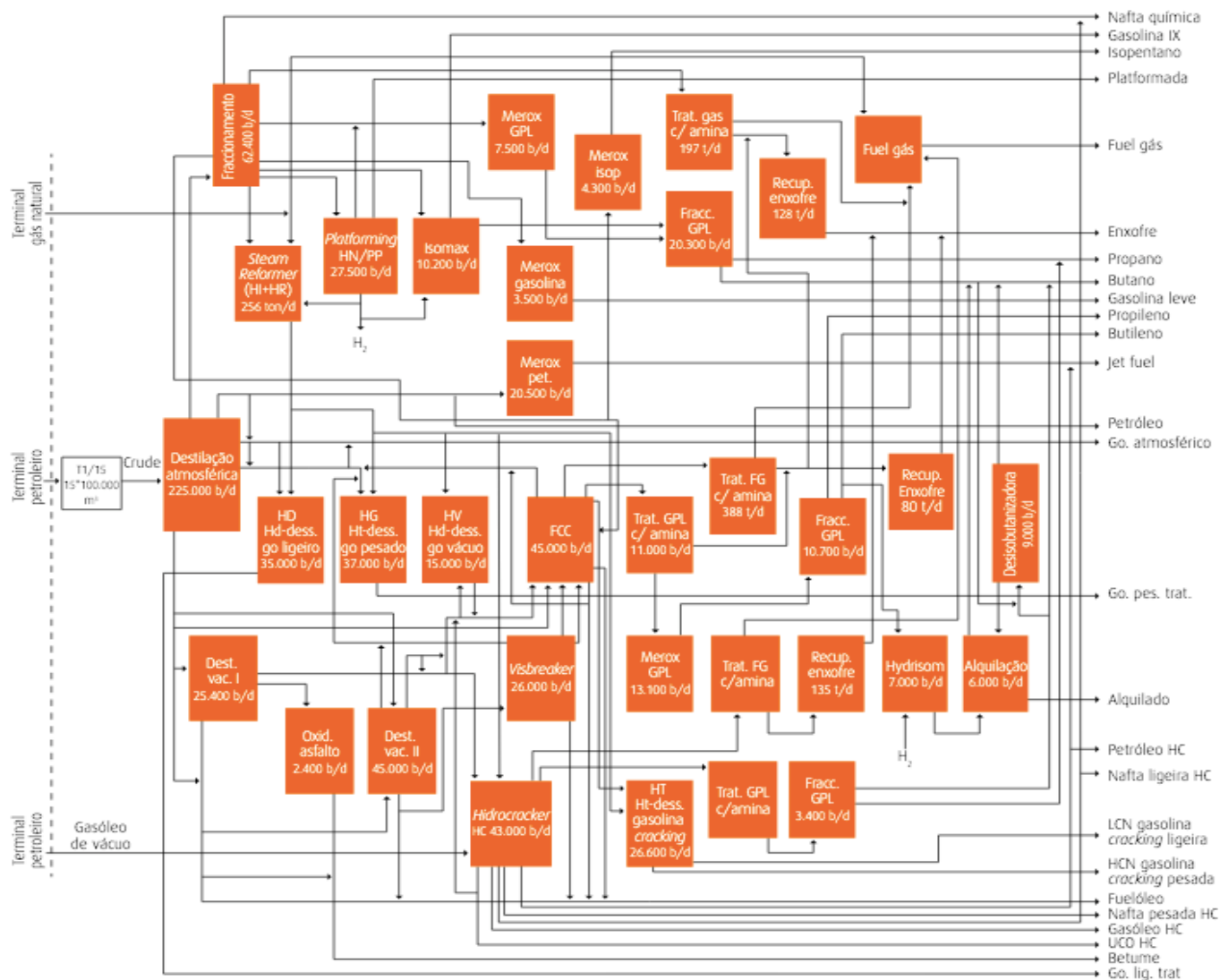


Figura A1.2 - Diagrama de processos da refinaria de Sines.

Fonte: (Galp Energia, 2013)

ANEXO 2 – CATEGORIZAÇÃO DE PETRÓLEO

Tabela A2 - Tipos de Petróleo.

Fonte: (Baptista, 2011)

Petróleo Pesado
Petróleo que existe na Venezuela, com um elevado teor de enxofre, ou no Canadá, misturado com areias betuminosas, e que obriga a um maior tratamento, mais limpeza e separação.
Petróleo Leve
Petróleo com poucas impurezas, fácil e barato de refinar. Surge em oposição ao petróleo pesado. Existe em países como Arábia Saudita e Rússia.
Pré-sal
Petróleo de boa qualidade, semelhante ao da Arábia Saudita, que está numa zona geográfica de difícil extração, a sete mil metros de profundidade, em alto mar, debaixo de uma camada de sal com dois mil metros de espessura. Este é o tipo de petróleo que a Galp tem no Brasil.
Ártico
Não é um tipo de petróleo, mas antes uma zona onde estão 25% dos recursos por descobrir. Estima-se que a qualidade deste <i>crude</i> seja boa, melhor do que o da Venezuela, mas questões ambientais e o facto de estar numa zona de temperaturas geladas dificultam a extração.
Shale oil
Têm estado a ser desenvolvidas tecnologias para extrair um tipo de petróleo ainda muito pouco conhecido, o shale oil, um <i>crude</i> que fica retido nas rochas depois da extração normal, mas que ainda pode ser usado quando tratado adequadamente.

ANEXO 3 – COLUNA DE DESTILAÇÃO

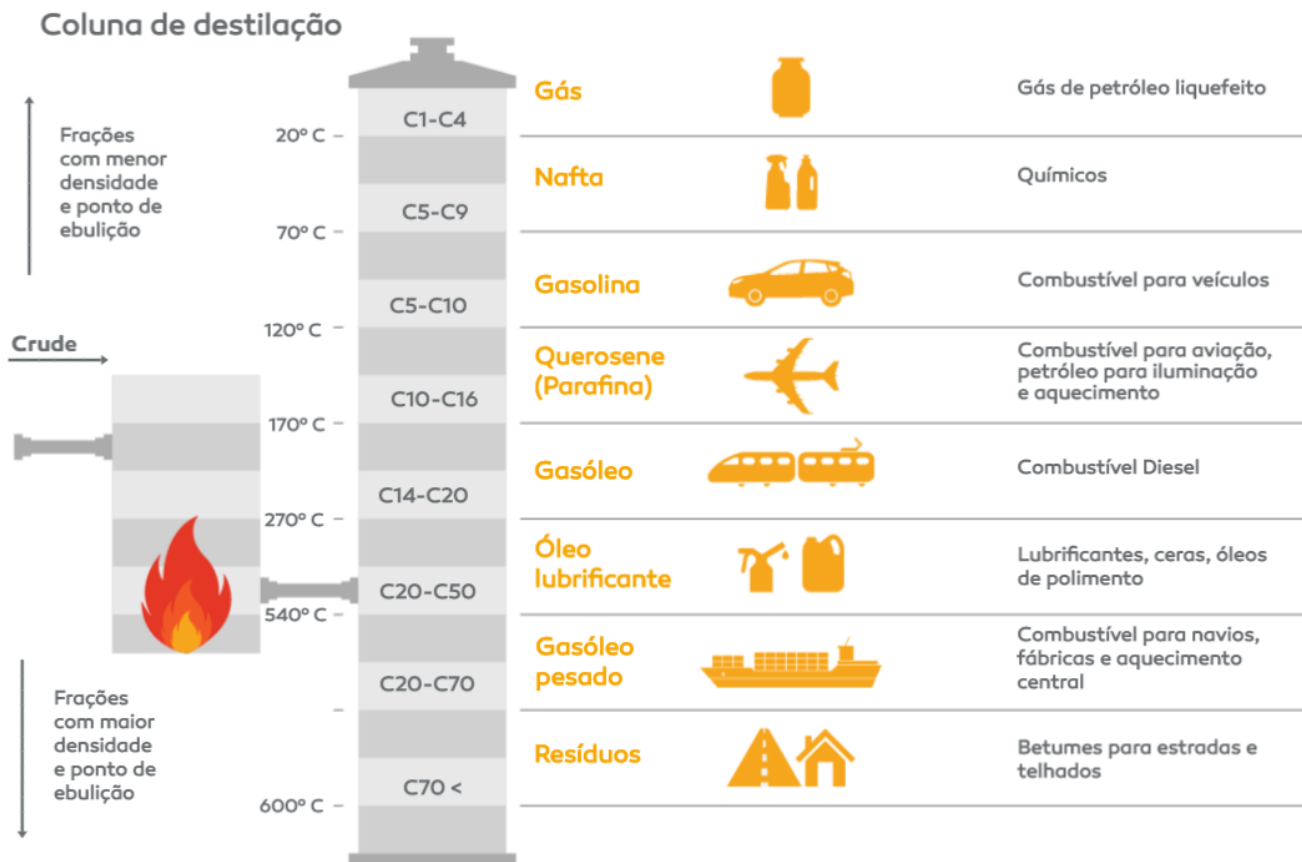


Figura A3 - Esquema de uma coluna de destilação.

Fonte: (Galp, 2020d)