

1

Introdução

A procura por sistemas conversores de energia química em energia mecânica (motores) mais eficientes não tem somente como objetivo a redução do consumo de energia, mas, também a diminuição dos agentes poluentes emitidos para o meio ambiente. Tendo isto em conta, durante as últimas décadas, os principais países consumidores investem na inclusão de fontes de energia limpas e renováveis, mediante a formulação de uma série de medidas com a finalidade de reduzir os níveis de emissão de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos, diminuindo o uso de fontes energéticas não renováveis na matriz energética.

No processo de diversificação das fontes, e produção de energia de maneira mais limpa e sustentável do ponto de vista dos recursos disponíveis, o Brasil leva vantagem em relação a outros países. As condições geográficas e o conjunto de reservas naturais, somado às iniciativas postas em prática no passado, colocaram o país em uma posição privilegiada. Segundo estudos atuais, a participação das fontes renováveis na matriz energética do Brasil foi de 40,4 % e 39,4% nos anos 2013 e 2014 respectivamente, muito acima da média mundial (13,2% em 2012) [1]. A base desse poderio provém da geração de energia mediante hidrelétricas (11,5%) e o uso da biomassa, onde se destaca, principalmente, a produção canavieira (15,7%) [1].

Apesar dessa vantagem, o Brasil apresenta ainda uma elevada dependência do petróleo (39,4% em 2014). Entre os derivados de petróleo, o óleo diesel é considerado como uma fonte essencial para a economia brasileira (18,8% do consumo de energia total no Brasil em 2014), devido, principalmente, a seu uso na área do transporte público de passageiros e de carga (terrestre e marítimo) [1]. Isso tem agravado as condições climáticas das grandes cidades e o balanço de pagamentos do país, por conta das importações deste combustível (16,78% do consumo total - 2014) [1]. Na Figura 1.1, mostra-se as emissões totais de CO₂-eq associadas à matriz energética brasileira, onde cabe destacar a grande participação do setor de transportes. Segundo este estudo, o total emitido em 2014 teve um incremento de 5,7% em relação ao ano de 2013 [1]. Como forma de quantificar a grande necessidade de se aumentar a participação das fontes

de energia limpas na matriz energética, citam-se as metas de redução das emissões de gases de efeito estufa de 37% até 2025 e de 43% até 2030 em relação ao ano base 2005 (2,032 milhões de toneladas em CO₂-eqs [2], Figura 1.2). Estas metas foram propostas no COP 21 realizado em Dezembro de 2015. Conforme pode se perceber na Figura 1.2, a estimativa das emissões brasileiras tem uma queda devido principalmente à diminuição das emissões correspondentes ao setor de uso da terra e floresta.

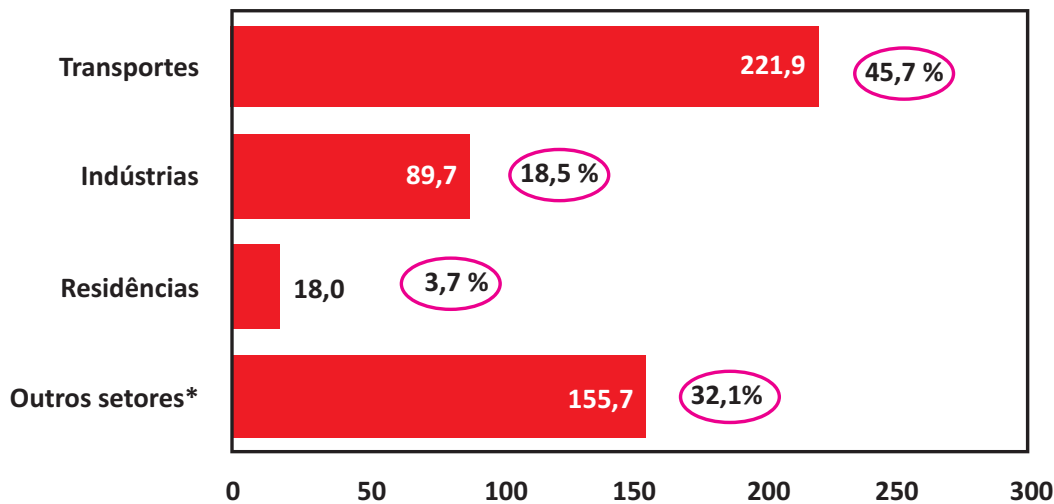


Figura 1.1: Emissões antrópicas totais associadas à matriz energética brasileira (2014), em MtCO₂-eq.

*Inclui os setores agropecuário, serviços, energético, elétrico e as emissões fugitivas.

Fonte: BEN 2015 [1].

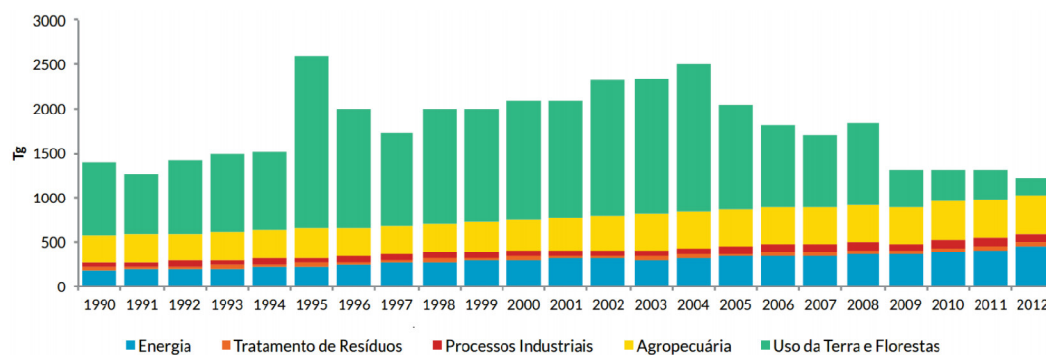


Figura 1.2: Emissões brasileiras de gases de efeito estufa, período 1990-2012 em CO₂eq .

Fonte: Estimativas Anuais de Emissões de gases de Efeito Estufa no Brasil [2].

De acordo com a Associação de Fabricantes Europeus de Automóveis, os motores de ignição por compressão (ICO) consomem 30% menos combustível e emitem 25% menos CO₂ em média, quando comparados com os motores de ignição por centelha (ICE) [3]. Ainda do ponto vista ambiental, é oportuno ressaltar que os motores de ignição por compressão apresentam vantagens e desvantagens. Apesar de serem considerados menos poluidores, pelo fato de terem um consumo menor de energia e, portanto, uma menor emissão de CO₂ [4], este tipo de motor emite elevados níveis de óxido de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP), presentes nos seus gases de exaustão. Some-se a isto os ruídos durante a combustão, normalmente superiores aos emitidos pelos motores ICO. Todos esses efeitos são nocivos, tanto ao ambiente, quanto à saúde, motivo pelo qual ficam vinculados a limites máximos estabelecidos em leis [5]. Também é importante mencionar as consequências decorrentes da emissão destes poluentes ao meio ambiente, tais como, formação de chuva ácida, mudanças climáticas e deterioração da qualidade do terra e da água, além de problemas de visibilidade [6].

Apesar da incerteza sobre qual será a próxima, ou próximas fontes de energia para os motores, o etanol tem captado a atenção mundial, devido ao fato de ser uma fonte de energia renovável. Ao longo dos últimos 40 anos, diversas equipes de pesquisa e desenvolvimento estudam as diferentes formas para que o etanol possa ser o substituto do diesel nos motores de ignição por compressão. Estes estudos foram motivados, principalmente, pela crise do petróleo de 1973. A raiz desta crise, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) com a finalidade de reduzir a grande dependência do petróleo importado e criar um mercado adicional para os produtores de açúcar, incentivando a indústria automobilística no desenvolvimento e fabricação de carros movidos exclusivamente a etanol [7]. Na primeira fase do Programa, o seu principal objetivo consistia na produção de etanol anidro para a mistura com gasolina. Esforços em pesquisa e desenvolvimento direcionados à fabricação de carros movidos exclusivamente a etanol resultaram na criação destes veículos em 1978. Em decorrência ao segundo choque do petróleo em 1979, o governo brasileiro decidiu aumentar o uso combustível do etanol, assinando acordos com fabricantes de automóvel e estimulando a construção de um grande número de destilarias autônomas. Desta forma, iniciou-se a produção em larga escala do etanol hidratado. O substancial crescimento das exportações de açúcar, na década de 1990, resultou em escassez e racionamento do etanol, comprometendo os objetivos originais do programa com o declínio do consumo deste combustível no Brasil que se estendeu até 2003. Neste ano, surge no mercado nacional o veículo flex-fuel ou biocombustível, cuja

tecnologia permitia o uso de etanol hidratado ou gasolina C, em qualquer proporção da mistura destes, possibilitando ao consumidor final a escolha do energético para abastecer o seu automóvel. Aliada à grande disponibilidade de etanol e contando com a infra-estrutura já existente de abastecimento em todos os postos, esta tecnologia promoveu um novo impulso ao mercado deste combustível. Desta maneira, o flex-fuel permitiu que o etanol pudesse competir com a gasolina em todo Brasil. Em junho de 2008, o etanol hidratado já era o combustível mais viável economicamente em 19 estados [8].

Baseado nos cálculos teóricos do ciclo diesel utilizando etanol ou óleo diesel, apresentados na Figura 1.3, demonstra-se que a combustão do etanol e do óleo diesel convencional, em um motor ignição por compressão, produz, em ambos os casos, quase a mesma eficiência e, conseqüentemente, a mesma pressão média efetiva, o que implica praticamente na mesma liberação de calor [9]. Os valores descritos na Figura 1.3 referem-se ao ciclo teórico do motor de ignição por compressão e não podem ser transferidos diretamente a um motor de ignição por compressão real. No entanto, estes valores indicam os efeitos vantajosos da mudança do óleo diesel para o etanol, ou seja, para um determinado regime, pode-se esperar um menor nível de temperatura de combustão, e, portanto, uma menor formação de NO_x .

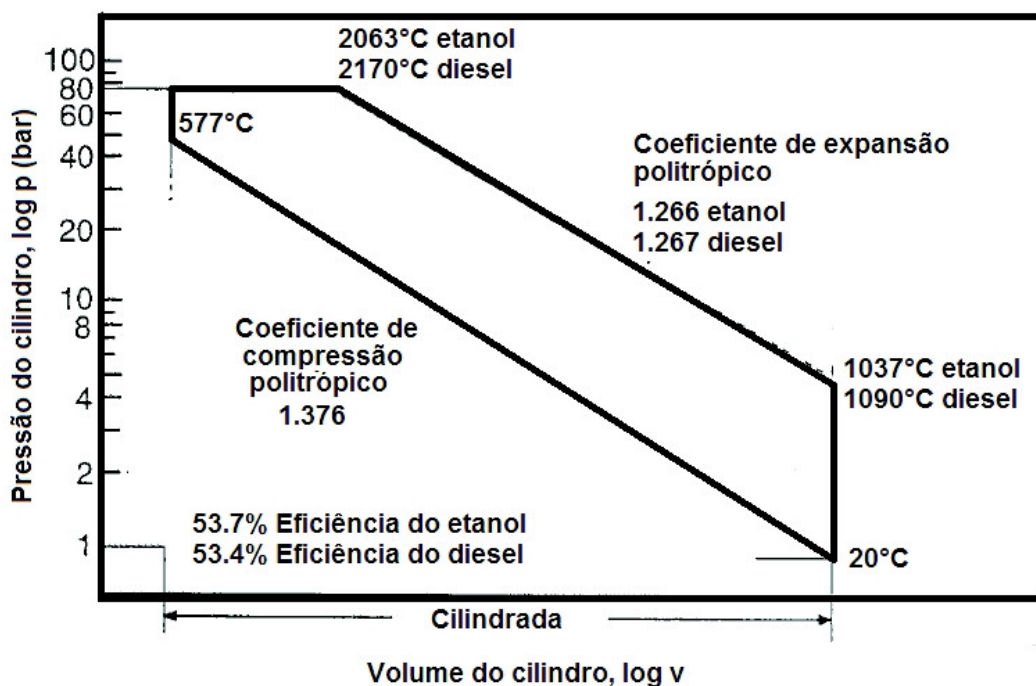


Figura 1.3: Ciclo termodinâmico do motor de ignição por compressão para a combustão de óleo diesel e etanol

Fonte: The Use of Ethanol as a Fuel for Compression Ignition Engines [9].

É com este objetivo que, há mais de trinta anos, uma equipe da Daimler - Benz AG [10], estuda diferentes formas de uso do etanol, com a finalidade de que este possa ser utilizado em motores de ignição por compressão, apesar do seu baixo número de cetano, em comparação com o óleo diesel. Este fato origina um maior atraso da ignição, não desejável neste processo [11]. Tal procedimento vem sendo realizado sem variar a razão de compressão dos motores, e sim melhorando o número do cetano do etanol, mediante a adição de aditivos melhoradores da autoignição. Para isto são utilizados diferentes produtos compostos de nitrato, tais como: Kerobrisol MAR, Cetanox 105, DII3 e DII2. O objetivo era alcançar, em primeira instância, o número de cetano mínimo para o etanol entrar em combustão. Uma vez atingido o objetivo, elaborou-se uma relação de requisitos que se deveria cumprir, com a finalidade de que o novo combustível (etanol + aditivo melhorador da autoignição) fosse eficiente também em termos econômicos. Estes requisitos são descritos a seguir:

- Deve-se utilizar a mínima quantidade de aditivo com a finalidade de ter uma combustão adequada.
- O preço do novo combustível não poderia superar em 20% o preço do etanol, dado que a eficiência global de um motor de ignição por compressão, sob condições normais de funcionamento, é pelo menos 20% melhor do que o motor de ignição por centelha operando com etanol.
- O aditivo tem que ser solúvel com o etanol e de fácil armazenamento.
- O etanol aditivado tem que conter produtos que melhorem sua lubrificidade.
- Os poluentes emitidos pelo etanol aditivado, não podem ser originados pelo aditivo.

Passada esta fase inicial, os estudos visando o uso do etanol em motores de ignição por compressão tiveram uma parada, devido às conjunturas políticas e, principalmente, à redução do custo do óleo diesel no mercado internacional. Trabalhos na década de 90 foram retomados, com uma nova perspectiva. Além de procurar um combustível substituto economicamente viável, a diminuição dos agentes poluidores, decorrentes da combustão, passou a ser um parâmetro relevante, mais importante até do que os fatores econômicos. Por estas razões, os estudos foram retomados, com a finalidade de se utilizar um novo composto, que permita, ao ser misturado ao etanol, alcançar os resultados já obtidos com as misturas de etanol e os compostos nitrogenados [12]. Assim, aparecem os PEG (polietilenoglicol) como fortes candidatos a agentes melhoradores da autoignição do etanol.

Testes realizados com BERAID 3527, PEG 610, 650, 730 e 760, deram resultados interessantes para a redução do atraso da ignição ((0,2 - 0,5)ms e (0,2 - 0,7)ms para temperaturas do ar de admissão de 200 e 180°C, respectivamente), mas cabe mencionar que estes resultados só foram conseguidos a uma determinada condição, com IDI (Início da Injeção) de 4,4°CA antes do PMS e temperatura do ar de admissão de 180 - 200 °C) [12]. Estas condições devem ser levadas em conta na hora de se projetar o funcionamento de um motor que irá operar com etanol, mediante ignição por compressão.

Estas condições, que são resumidas de forma clara no artigo sobre as perspectivas na utilização de etanol em motores de ignição por compressão [13], indicam que existem três mecanismos que garantem que o atraso da ignição seja o menor possível, de tal forma que se tenha uma boa combustão e baixa concentração de HC nos gases de escapamento. A origem principal de uma má combustão do etanol aditivado é o maior atraso de ignição com relação ao diesel. Para isto é recomendável pré-aquecer o ar de admissão, utilização de uma vela incandescente (*glow plug*) ou um sistema recirculação de gases de escapamento (EGR). Dos três mecanismos acima, o pré-aquecimento do ar de admissão foi o que gerou os melhores resultados, sendo, portanto, o mais recomendado.

Nos testes realizados mencionados no artigo [12], utilizou-se ar de admissão pré-aquecido a uma temperatura de 180 e 200°C. Os resultados dos PEG's e do BERAID 3527 foram similares para as diferentes condições de teste. Mas, o que é importante ressaltar, é que, quanto maior a temperatura do ar de admissão, menor é o atraso da ignição [14]. Deve-se também mencionar que, quanto maior a percentagem do aditivo, menor é o atraso da ignição. Outro parâmetro importante, com relação aos PEG, é que, quanto maior é o peso molecular do PEG, menor é o atraso da ignição da mistura deste com o etanol. Em compensação, uma desvantagem que se observa é que, um maior peso molecular diminui a solubilidade no etanol.

Para que o etanol possa ser efetivamente utilizado como combustível em motores de ignição por compressão, além da melhora da sua autoignição, recomenda-se reduzir seu alto poder corrosivo e a sua baixa lubrificidade quando comparado ao óleo diesel convencional, ou adequar os materiais utilizados nos motores ICO, como é feito nos motores ICE.

Outras pesquisas realizadas com a finalidade de utilizar o etanol nos motores de ignição por compressão, compreendem a utilização de hidrogênio misturado ao ar na admissão [15]. A finalidade nestes estudos é a mesma, a diminuição do atraso de ignição. Estes estudos foram conduzidos com uma razão de compressão de 24:1 e temperatura do ar de admissão igual a 120°C.

O hidrogênio era injetado em percentagens de 2 a 5%, no coletor de admissão, através de um sistema de injeção no coletor de admissão (*PFI*). Para melhorar a lubricidade foram utilizados óleo de rícino e ácido láurico, em proporções de 1 a 3%.

Patentes publicadas em 1995 (WO1995005437A1) [16] e 2010 (EP 2204433 A1) [17], ambas direcionadas à utilização etanol no processo de ignição por compressão, mencionam a utilização do PEG 400 e o PEG 600, e ressaltam que uma maior temperatura do ar de admissão implica em menor tempo para a ignição do combustível.

Hoje em dia, muitas pesquisas estão sendo realizadas para substituir o diesel por combustíveis alternativos. O biodiesel e o etanol são fortes candidatos para esta finalidade, pelo seu caráter renovável. No entanto, o estudo experimental da combustão de biocombustíveis em motores não é uma tarefa fácil. Devido às grandes diferenças entre as propriedades dos novos combustíveis e o diesel convencional, alterações radicais podem ser necessárias nos motores atuais, desenvolvidos especificamente para o combustível fóssil. Exemplos acima foram mencionados, onde a razão de compressão foi substancialmente elevada. Isto, além de demandar alterações nos projetos originais, implica em elevadas pressões e temperaturas, que afetam, não só a operação, como também a vida útil do motor. Assim, estudos experimentais da ignição por compressão do etanol não são simples de serem realizados nos motores convencionais. O uso de aparatos experimentais, para a realização de testes iniciais, pode ser uma saída para orientar as melhores formas de condução de um segundo estudo em motores. A máquina de compressão rápida (MCR) é um destes equipamentos. Versátil, e de rápida configuração, a MCR permite que, de forma simples e ágil, sejam variados parâmetros, como a razão de compressão, por exemplo, sem que sejam necessário a fabricação ou troca de partes. Isto permite a realização de testes rápidos, úteis nesse tipo de estudo.

Durante mais de 30 anos, o etanol tem sido utilizado como fonte de energia química na propulsão de veículos com motores de ignição por compressão [18]. Pesquisas nos últimos anos têm mostrado resultados positivos: desde 2006, a União Européia tem incentivado o projeto BEST - Bioetanol para o Transporte Sustentável, coordenado pela cidade de Estocolmo, na Suécia [19]. Este projeto tem como objetivo testar o uso de etanol aditivado em veículos de transporte público, em várias cidades do mundo, incluindo São Paulo [20]. Em São Paulo, o projeto foi realizado com parceria de várias empresas: a Scania América Latina importou o chassi e o motor da Suécia, a Marcopolo projetou, construiu e forneceu a carroceria [21], a UNICA - União da Indústria de Cana de Açúcar forneceu o etanol para testes e a BAFF / SEKAB o aditivo. Fi-

nalmente, a Petrobras se encarregou da importação deste aditivo [20]. A esta mistura, usada em motores de ignição por compressão, na proporção (% v/v) de 95% de etanol e 5% do aditivo com características de melhoramento de ignição, é dado o nome de ED95 [19].

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de duas etapas principais:

- Avaliação e determinação de possíveis substitutos ao óleo diesel e
- Testes destas misturas na MCR, selecionadas sob condições de operação em motor de ignição por compressão, para análise e determinação dos parâmetros da ignição.

As pesquisas foram conduzidas com a finalidade de executar testes de ignição em diferentes combustíveis: diesel (S50), etanol-aditivado (ED95), descrito em maiores detalhes mais a frente, que já é utilizado internacionalmente e misturas de etanol hidratado com polietilenoglicol (PEG) ou butanol, em diferentes proporções e para diferentes razões de compressão e tempo de injeção. Para tal, a MCR foi equipada com um sistema de injeção original de motores ICO (*Common-Rail*), um sensor piezoelétrico e seu amplificador e uma câmara de alta velocidade. Com esta instalação é possível comparar os processos de ignição destes diferentes combustíveis, sob diferentes condições de operação. Condições tais que demandariam muito esforço, tempo e recursos financeiros, se executadas em motores de combustão interna. De posse dos resultados obtidos com este sistema, é possível propor modificações e testes a serem realizados em motores, evitando aqueles que já se mostraram inviáveis na MCR. Em uma etapa seguinte, que não foi feita neste trabalho, será possível correlacionar os resultados dos testes realizados na MCR com testes em motores.

Este trabalho tem por objetivo, como já mencionado, escolher, como resultado dos testes na MCR, os melhores candidatos a substituto do diesel, para testes futuros em motor. A idéia é que, dos resultados deste trabalho, sejam propostas modificações a serem realizadas no motor citado, como razão de compressão. Antes de se modificar o motor será realizado um mapeamento do mesmo em sua configuração original, operando com diesel. Posteriormente serão introduzidas as modificações sugeridas e realizados os testes com as misturas testadas e aprovadas anteriormente na MCR. Espera-se que sejam atingidas no motor as condições necessária para a realização do processo de combustão. Este estudo será objeto de um novo trabalho de pesquisa, não estando incluído neste trabalho.

1.1

Objetivos

As pesquisas desenvolvidas neste trabalho são parte de um projeto maior, desenvolvido pelo Instituto de Energia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (IEPUC) no Laboratório de Engenharia Veicular da PUC-Rio (LEV).

Este trabalho ocorreu em três etapas básicas:

A primeira etapa, consistiu na pesquisa das propriedades de diferentes compostos químicos que pudessem servir como melhoradores da autoignição do etanol.

Na segunda etapa foram realizados testes preliminares com a finalidade de se determinar os percentuais destes compostos a serem misturados ao etanol, bem como as condições de testes necessárias para que aconteça a ignição por compressão da mistura injetada.

Como etapa final, e dentro do objetivo geral, foram realizados testes na máquina de compressão rápida, com base nas informações dos testes preliminares, com a finalidade de propor novas técnicas de injeção e características dos motores, de modo que o etanol (com melhorador da autoignição) possa entrar em combustão e esta se dê de forma adequada.

Com base na revisão bibliográfica realizada, o aporte inédito deste trabalho é o estudo da ignição/combustão da mistura de etanol e n-butanol em um processo de ignição por compressão para diferentes razões de compressão, e a comparação dos parâmetros da combustão deste novo combustível com outras misturas testadas e o óleo diesel.

1.2

Organização da Tese

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, focado no estudo e desenvolvimento de combustíveis alternativos que possam substituir o diesel em motores de ignição por compressão. Para a realização desta pesquisa foram escolhidas as características geométricas do motor DW10CTED4 (PSA Groupe).

Este primeiro capítulo refere-se à introdução, que contextualiza o problema e apresenta os objetivos desta tese.

No capítulo dois, revisa-se o contexto que engloba os motores de ignição por compressão, a utilização do etanol nestes motores, as propriedades do etanol e uma revisão dos trabalhos atuais.

No capítulo três é mostrada a metodologia de testes e o equacionamento empregado na redução de dados e no cálculo das variáveis de interesse.

O aparato experimental empregado é apresentado no capítulo quatro.

Os resultados e as respectivas discussões constituem o capítulo cinco.

A presente tese é concluída no capítulo seis, onde são resumidos os principais resultados atingidos, bem como são apresentadas as propostas de continuidade dos testes em motores de combustão interna. Sugestões para outros trabalhos e melhorias a serem adotadas em futuros trabalhos encerram este capítulo.