

1. Introdução

Até a década de 1970 o baixo preço do petróleo possibilitava o crescimento desenfreado de seu consumo. Galbraith (1958), economista norte americano recentemente falecido, considerava esta uma das características do que denominava a “sociedade da abundância”. A partir de 1973 conflitos no Oriente Médio fomentaram uma profunda alteração deste quadro. No Brasil, país com sistema de transportes basicamente rodoviário, tais crises tiveram efeitos danosos. O País, naquela época, produzia apenas cerca de 20% de seu consumo total de petróleo. Da abrupta escalada de preços do mineral e seus derivados resultaram desequilíbrios em nossa balança de pagamentos externos, levando o país à moratória. Esforços inadiáveis, tanto na reorientação do perfil energético brasileiro, quanto no incremento da eficiência dos equipamentos que demandam os combustíveis tradicionais foram iniciados.

Dentre as ações tomadas para a redução de nossa dependência dos derivados de petróleo destacam-se as de fomento ao uso de energéticos alternativos e renováveis. O Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL), iniciado em meados da década de 70, viabilizou a substituição da gasolina pelo combustível renovável junto aos veículos com motorização do ciclo Otto. A sazonalidade das safras de cana e oscilações do preço do açúcar no mercado internacional, fatores que têm impacto sobre a produção e preço do energético renovável foram, no passado, responsáveis pelo quase abandono do uso do etanol em veículos leves. Durante a década de 1980, quando carros de passeio a álcool respondiam por mais de 90% das vendas de veículos leves novos, o País passou por uma fase de desabastecimento do energético renovável. Esta levantou suspeita, junto aos usuários finais, quanto à confiabilidade do abastecimento de etanol.

Coincidência ou não, nesta mesma época se começou a comercializar no Brasil veículos contando com injeção eletrônica, inicialmente mono-ponto, de gasolina. Como o acesso aos sistemas de gerenciamento eletrônico era restrito apenas as montadoras, proprietárias dos *softwares* de controle dos sistemas de injeção de combustível, inibiram-se possíveis futuros movimentos de conversão de motores para o álcool. No início do PROÁLCOOL as conversões da frota a gasolina, para o uso do etanol, eram feitas em oficinas independentes. Era possível a estas fazer ajustes nos carburadores, na época componentes de uso corriqueiro, que permitissem o funcionamento adequado dos veículos

convertidos. Aliando a dificuldade de conversão da nova frota, com a má experiência daqueles que haviam investido, no passado, na conversão de seus veículos à operação com álcool hidratado, o interesse no uso do energético renovável foi paulatinamente diminuindo. Isso mesmo nos períodos de farta oferta quando, sem grande repercussão, o preço do álcool hidratado era competitivo com o da gasolina. Montadores continuaram comercializando até depois da virada do século, em quantidade extremamente reduzida e muitas vezes apenas sob encomenda, veículos a álcool ainda com os, então, já em desuso, motores com carburador. Pode ser que o uso do etanol em motores Otto apenas não tenha sido totalmente abandonado por sua adoção, em substituição ao chumbo tetraetila, como aditivo anti-detonante na formulação da gasolina brasileira. Álcool anidro é misturado, numa proporção que pode variar entre 20 e 25% em volume, à gasolina distribuída para consumo. A mistura é denominada de “gasolina C”.

O etanol teve sua vida renovada, a partir de 2003, por iniciativa das montadoras. Começaram a comercializar veículos capazes de operar, indistintamente, com o combustível renovável, gasolina ou a mistura de ambos em qualquer proporção. Tal flexibilidade permite aos usuários finais optar pelo combustível a consumir. Nos períodos de baixa oferta ou alto preço do álcool etílico esta nova motorização permite que se possa, a qualquer momento e sem maiores transtornos, simplesmente usar gasolina. Não são mais necessárias conversões sofisticadas como as da época inicial do PROÁLCOOL.

Dada a presença do etanol na composição da gasolina brasileira os componentes dos novos motores Otto, diferente dos carburadores no passado, já contam com resistência ao ataque químico do energético renovável. A sofisticação dos *softwares* para gerenciamento de motores hoje permite, pela medida do teor de oxigênio no escape (sonda lambda), entre outras, o ajuste em tempo real das estratégias de injeção e ignição. A operação adequada dos novos motores Otto depende de tais ajustes, variáveis conforme o teor de álcool e gasolina no combustível disponível no tanque. Hoje quase a totalidade dos veículos comercializados no país contam com tal motorização flexível. Estes já respondem, após três anos da introdução da tecnologia no mercado, por cerca de 5% da frota nacional de veículos leves. Passadas três décadas do início do PROÁLCOOL, o uso automotivo do etanol está maduro no País e desperta interesse de outras nações. França, EUA, China e Japão têm estudado a possibilidade de adquirir o biocombustível produzido a baixo custo no Brasil.

Cabe ressaltar que, embora hoje se esteja comemorando a auto suficiência brasileira em petróleo, nossa desproporcional demanda por alguns dos derivados força a importação de significativos volumes destes energéticos (Brasil, 2003). É o caso do óleo Diesel e do gás liquefeito de petróleo, GLP. De forma ilustrar a relevância destes produtos na matriz energética brasileira faz-se referência à Figura 1. Esta demonstra a participação percentual dos diversos energéticos no atendimento do total da demanda do País.

A hidroeletricidade atende 43% do total da demanda energética brasileira. É seguida pelo óleo Diesel (13,1%), os produtos da cana (incluindo o álcool etílico, 8,2%) e a lenha (6,2%). Os derivados de petróleo, em conjunto, respondem por 28,4% do total da energia consumida no Brasil. Dentre estes se destaca o óleo Diesel, segundo energético na matriz, e o derivado mais empregado. Representa quase metade do total dos derivados consumidos. O GLP, empregado fortemente nos setores residencial e industrial, atende 3,3% da demanda energética brasileira.

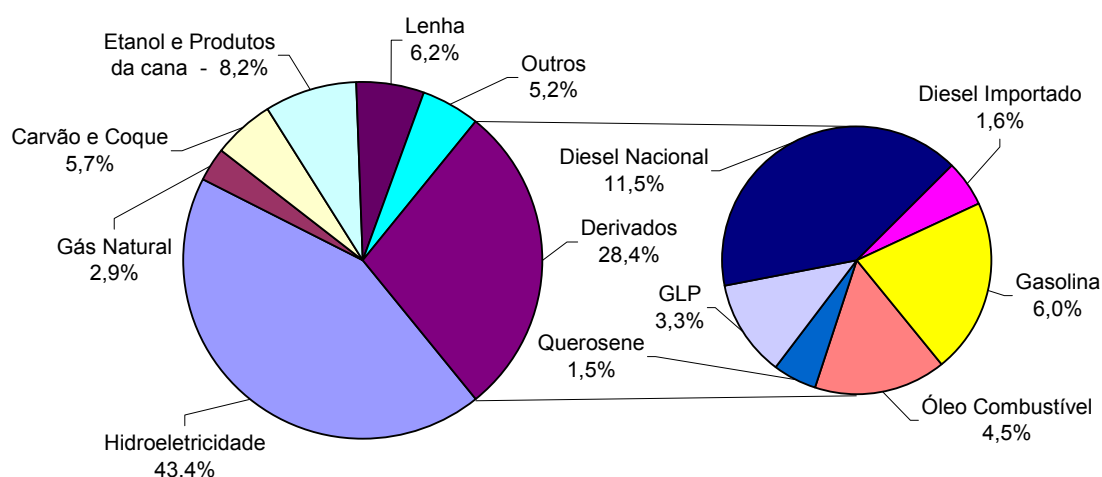


Figura 1: Composição da matriz energética nacional (Brasil, 2003).

Na Figura 2 discrimina-se a destinação dada ao Diesel no país. Hoje se consome no Brasil cerca de 100 milhões de litros de óleo Diesel por dia. Destaca-se o transporte rodoviário interurbano, com 78,1 milhões de litros diários. É seguido do transporte coletivo urbano, responsável pelo consumo de outros 12 milhões de litros por dia.

É interessante notar que o volume de Diesel importado é aproximadamente igual ao volume demandado no transporte coletivo urbano nacional. Caso energéticos renováveis ou alternativos viessem a substituir este

volume de Diesel, mesmo que parcialmente, a dependência brasileira relativa ao derivado importado poderia, se não eliminada, ser ao menos reduzida.

Em contraponto com a situação do Diesel, a produção nacional de gasolina supera a demanda do País. Hoje se exportam volumes significativos do derivado, especialmente para os Estados Unidos e África. Conversões de veículos do ciclo Otto para o gás natural, a adição de etanol ao derivado disponibilizado ao consumidor ou mesmo o simples uso do energético renovável em carros de passeio promovem um ainda maior excedente de gasolina. Esta situação não deixa de ser interessante, tanto do ponto de vista econômico como ambiental (Ahouissoussi e Wetzstein, 1997; Gordon e Austin, 1992). Exportam-se excedentes do derivado, valorizado no mercado internacional, e se consomem aqui energéticos alternativos e renováveis que, sabidamente, têm menor preço e impacto sobre o meio ambiente e saúde das populações (Beer et al., 2002; Johansson, 1999; Lapin et al., 2002).

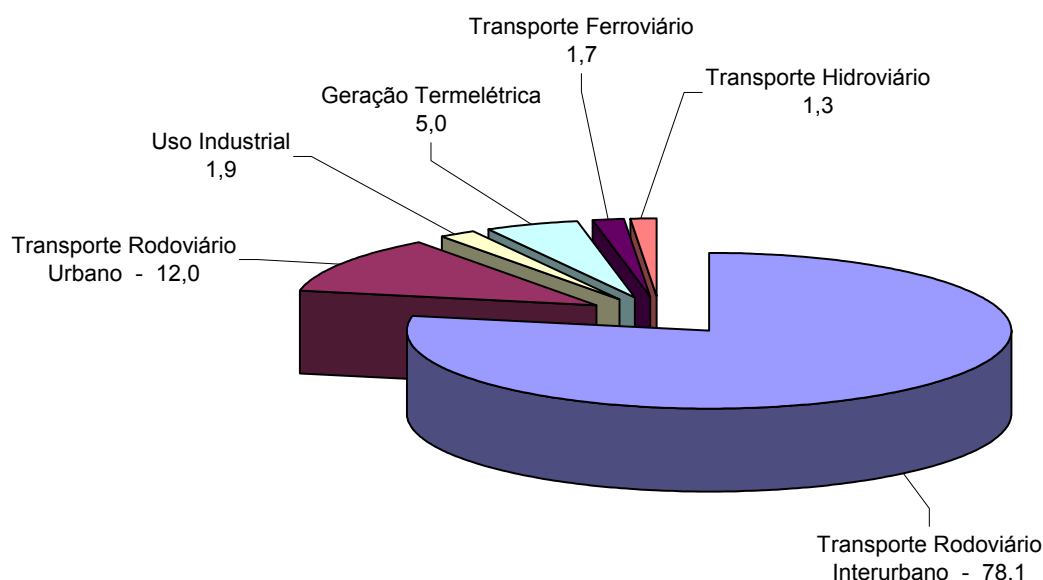


Figura 2: Consumo de Diesel no Brasil (milhões de litros por dia).

Iniciativas para a substituição do Diesel por outros energéticos também têm sido verificadas ao longo dos anos. Tratou-se no passado da adição do etanol ao Diesel, de forma análoga ao que se faz hoje na formulação da gasolina C, mistura de gasolina A e álcool anidro (Ali et al., 1995b). Como o etanol não se mistura espontaneamente com o Diesel, aditivos são requeridos na formação do colóide. Aparentemente a baixa lubricidade do etanol comprometeria a vida útil e desempenho das tradicionais bombas injetoras mecânicas (Boldo e Wahnfried,

2003). Este argumento pode não mais se aplicar no caso dos novos motores Diesel, que hoje contam com injeção eletrônica de combustível.

Cumpra aqui registrar que um fabricante de motores Diesel sueco mantém, já há mais de dez anos, uma frota de ônibus experimental em uso no transporte coletivo de Estocolmo. Os veículos de tal frota contam com motores (do ciclo Diesel) a etanol (Scania, 1997). Numa etapa inicial o sistema de injeção empregado em tais motores era mecânico, adaptado a partir das bombas injetoras para óleo Diesel. Aparentemente os materiais empregados nas juntas e *o-rings* das bombas injetoras para Diesel são quimicamente atacados pelo álcool etílico. Bastou a mudança dos materiais destes elementos de vedação para que o sistema operasse a contento, sem notícia de desgaste mecânico significativo do componente por baixa lubricidade do etanol. Mais recentemente passou-se a usar em tal frota motores com injeção eletrônica de álcool. Aparentemente a questão da baixa lubricidade do energético renovável também pode ser superada nos motores eletrônicos. Fica ainda indicação de que se podem operar motores do ciclo Diesel com combustíveis com número de cetano baixo como o do etanol. O fabricante reporta que as emissões de poluentes verificadas em tais motores ciclo Diesel, com injeção eletrônica de etanol, os enquadram dentro das atuais exigências ambientais regulamentadas para o uso veicular (EURO 4 e 5).

Em Dezembro de 2003 foi instituído o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB). Este fomenta a substituição do Diesel mineral pelo renovável biodiesel, produzido a partir de óleos vegetais. Em Janeiro de 2005 foi estabelecida a obrigatoriedade da adição de um percentual mínimo de biodiesel ao Diesel mineral comercializado em qualquer parte do território nacional. Esse percentual obrigatório será de 5% após 2013, havendo um patamar intermediário, também compulsório, de 2% já a partir de 2008. Acredita-se que esta iniciativa é válida e que, em alguns pólos regionais, possa constituir atividades de relevante cunho social. A produção do óleo vegetal necessário à produção do biodiesel (Altin et al., 2001; Bona et al., 1999; Cardone et al., 2003; Kallivroussis et al., 2002; Körbitz, 1999; Ma e Hanna, 1999) é uma atividade que exige mão de obra intensiva e que, certamente, será responsável pela criação de relevante número de novos postos de trabalho.

Em Fevereiro de 2006, já adiantando metas do PNPB, foi assinado o primeiro contrato de fornecimento de biodiesel no País. Este foi resultado de leilão realizado pela ANP em Dezembro de 2005, onde se acertou a compra, realizada pela PETROBRAS / Refap (RS), de cerca de 68.000.000 litros do biocombustível. O energético comercializado deverá ser entregue, em bateladas,

até Dezembro de 2006. O valor total deste fornecimento, a ser feito por quatro empresas que participaram do processo, é da ordem de 50 milhões de Reais (hoje aproximadamente 23 milhões de dólares). Planeja-se ainda para o ano de 2006 uma segunda aquisição de biodiesel. Estima-se que, desta vez, o volume a ser contratado seja da ordem dos 500.000.000 litros. Os industriais que comprovaram cunho social na produção do energético, atestado pela compra de oleaginosas de pequenos produtores rurais (agricultura familiar), tiveram abatimentos nos impostos federais da ordem de 70 – 100%, variável conforme a região do País onde estivessem instalados.

Os óleos vegetais que, após transformações químicas (Antolín et al., 2002; Chen e Wu, 2003; Crabbe et al., 2001; Dmytryshyn et al., 2004; Fukuda et al., 2001; Marinkovic e Tomasevic, 1998), se prestam ao uso como biodiesel (Geller et al., 1999; Goodrum, 2002; Graboski e McCormick, 1998; Kalam e Masjuki, 2002; Knothe et al., 2003; Kumar et al., 2003) também podem ter aplicação na indústria cosmética e alimentícia. Nestes usos o óleo encontra preço superior ao hoje praticado para o biocombustível (Raneses et al., 1999). Existe possibilidade, análoga à já vivenciada com o álcool, de períodos de baixa destinação do óleo vegetal para o uso combustível, conforme o preço e demanda para tais outros usos. De outra forma sabe-se que o combustível derivado da biomassa pode ser consumido em motores, misturado ao Diesel mineral, em variáveis proporções (Ali et al., 1995a; Arkoudeas et al., 2003; Kalligeros et al., 2003; Laforgia e Ardito, 1995; Monyem e Gerpen, 2001; Peterson et al., 1996; Pramanik, 2003; Schumacher, 1996; Silva et al., 2003; Stumborg et al., 1996). Em possíveis períodos de baixa oferta do energético renovável sua adição ao Diesel mineral poderia, sem problemas, ser reduzida. Os rejeitos de óleos vegetais como, por exemplo, é o caso do óleo de cozinha usado, hoje não encontram demanda para usos distintos da produção de biodiesel (Alcântara et al., 2000; Al-Widyan et al., 2002; Dorado et al., 2003; Gómez et al., 2002; Scragg, 2003; Tomasevic e Marinkovic, 2003; Widyan e Shyoukh, 2002; Zhang et al., 2003a,b).

Muito recentemente foi anunciada pela PETROBRAS a possibilidade da transformação de óleos vegetais em combustível já junto ao processo de refino do Diesel mineral. Produtos da biomassa seriam agregados, como matéria prima, ao mineral em alguma etapa de seu processamento. O energético resultante está sendo chamado de “H-Bio” e, anuncia-se, que cerca de 10% de seu volume seria derivado da biomassa. Aparentemente tal processamento

conjunto de produtos de origem mineral e vegetal facilita e reduz os custos da produção de um energético com baixos níveis de enxofre.

As emissões de poluentes particulados de motores operando a biodiesel, qualquer que seja o óleo vegetal empregado em sua produção, parecem ser sempre inferiores às verificadas na queima do Diesel mineral (Sidhu et al., 2001). Normalmente atribui-se esta constatação ao fato do biodiesel já conter átomos de oxigênio em sua composição. Aparentemente estes, de alguma forma, contribuem para a combustão do energético renovável.

Alguns autores argumentam que a produção de biocombustível no Brasil, a partir da cultura da cana de açúcar (etanol), dificilmente pode ser batida no curto prazo pelas de oleaginosas, insumo básico para a produção de biodiesel (Leal, 2005). Após três décadas de melhorias contínuas na cadeia produtiva do álcool etílico combustível esta hoje conta, entre outras, com: plantio e colheitas mecanizadas, correta destinação dos rejeitos (geração de eletricidade com a queima do bagaço) e variedades genéticas de cana de açúcar especialmente desenvolvidas para a produção ótima de álcool combustível. Afirma-se que a cadeia produtiva do etanol produza hoje 6,1 m³/hectare.ano do combustível. Já, caso a área agricultável do território brasileiro fosse destinada à produção de óleos vegetais se obteria, mesmo em um cenário otimista, apenas cerca de 1,8 m³/hectare.ano de biodiesel.

A produção mundial de etanol (combustível ou para uso químico) é hoje da ordem dos 30.000.000 m³/ano. O Brasil responde por pouco mais da metade deste volume. A outra metade é produzida nos EUA, sem preço competitivo com o álcool brasileiro ou área agricultável disponível para aumento de produção. A participação dos demais países na produção do energético é extremamente pequena (IEA, 2004). Já, no caso do biodiesel, toda a produção e consumo mundial se concentram hoje nos países da União Européia. Atualmente o volume comercializado é da ordem dos 1.800.000 m³/ano (uma ordem de grandeza inferior a do etanol). O mercado para ambos os biocombustíveis quase que dobrou nos últimos cinco anos. Dificilmente a produção não subsidiada ou sem proteções tarifárias de biocombustíveis nos EUA ou Europa fará frente à de países com forte vocação agrícola, caso do Brasil. Tem-se notícia de empresas brasileiras que têm exportado módulos eletrônicos para a conversão ao funcionamento bicombustível (gasolina e/ou etanol) de motores Otto originalmente a gasolina. Existem internamente aos EUA movimentos de grupos ambientalistas que questionam a taxaço sobre importações do combustível

renovável brasileiro uma vez que, sobre a compra de óleo cru, seja ele Venezuelano, Nigeriano ou de qualquer outra procedência, não incidem tributos.

Difícilmente se pode imaginar a adoção de políticas que venham a fomentar, no curto prazo, alterações significativas na matriz energética mundial. Ao que tudo indica a tendência pela adoção de biocombustíveis, em substituição aos derivados de petróleo, se manterá ao longo das próximas décadas. Sua oferta e uso provavelmente crescerão gradualmente ao longo dos anos deslocando, paulatinamente, os derivados. Uma farta e simultânea oferta de energéticos concorrentes (renovável e mineral), descasada da demanda do uso final comum, pode comprometer a remuneração do investimento feito na produção de ambos. Aparentemente o etanol brasileiro entrará, no curto prazo, no mercado americano como aditivo anti-detonante da gasolina. Substituirá o MTBE, composto sintético, cancerígeno e fortemente poluente, usado hoje nos EUA para esta finalidade. Não se deve imaginar que a adoção de energéticos renováveis ou alternativos, em substituição aos derivados, reduzirá a exploração e busca por novas reservas de petróleo. O mineral continuará sendo empregado como insumo petroquímico, uso mais nobre do que como combustível.

É notável o crescimento da participação do gás natural na matriz energética brasileira. Passou de 0,2% (Cecchi, 1995) para 2,9% (Fig. 1) entre 1970 e 2002. As reservas nacionais de gás exploráveis passaram de 72,4 bilhões de metros cúbicos em 1982 para 137,8 bilhões em 1993. Neste mesmo período a produção diária nacional saltou de 3,7 para 19 milhões de metros cúbicos. Descobertas recentes de gás natural no litoral do sudeste brasileiro (Espírito Santo e bacias de Campos e Santos) incrementam, de forma significativa, as reservas do País. Estima-se que apenas as reservas do campo de Santos, região que vai do litoral de Santa Catarina, altura de Florianópolis, até Arraial do Cabo, em águas Fluminenses, devam superar os 400 bilhões de metros cúbicos. Projeta-se até 2010 um aumento anual de consumo de gás natural no Brasil acima dos 10%. Estima-se que durante este mesmo período a produção da Bacia de Santos alcance os 30 milhões de metros cúbicos diários. Prospeções indicam que o bloco BS-500, concessão exploratória localizada aproximadamente na altura dos municípios do Rio de Janeiro e Niterói, será responsável por dois terços da produção de gás na Bacia de Santos.

Hoje são diariamente consumidos no País cerca de 50 milhões de metros cúbicos de gás natural. Metade desta demanda é suprida pela produção nacional. Os demais 25 milhões de metros cúbicos diários são comprados da Bolívia e transportados até o mercado brasileiro pelo Gasoduto Bolívia Brasil

(GASBOL). Este tem capacidade para transporte diário máximo de 30 milhões de metros cúbicos. Durante sua construção foram tomados os cuidados necessários para um possível aumento futuro de sua capacidade de transporte. Estima-se que até 2010 o gás de produção nacional atenderá 70% de nossa demanda pelo energético. Em sendo o custo do gás natural compatível ao do óleo combustível, o fomento de seu uso se justifica na medida em que substitui energéticos mais valorizados e de fácil comercialização no mercado internacional.

Não se pode deixar de citar o recentemente anunciado projeto de integração energética da América do Sul, hoje em formatação. Planeja-se a construção de um novo gasoduto que interligaria as malhas de dutos instaladas no Brasil, Argentina, Chile, Bolívia e Peru às reservas de gás Venezuelanas. Tanto o traçado do novo gasoduto como sua capacidade de transporte ainda não estão definidos, mas, estima-se que terá extensão total da ordem de 4 – 10 mil quilômetros. Deverá ser capaz de transportar, diariamente, entre 100 e 150 milhões de metros cúbicos de gás natural. Avalia-se que as obras para sua construção demandarão cerca de dez anos. Tal integração energética do continente também contribuirá para o aumento da oferta do gás natural no país. Por outro lado, também há fortes indícios da inviabilidade, por várias razões, de tal projeto: econômica, ambiental e, ainda, as associadas à instabilidade política dos países da América do Sul. Movimentos populistas em nossos vizinhos, ao levantar incertezas com relação ao preço e fornecimento do energético alternativo, têm a tendência de inibir tal integração energética. No entanto é razoável pensar que, no longo prazo, o projeto virá a se concretizar. O gás natural, quando transportado via gasodutos, se torna economicamente competitivo com os derivados líquidos. Sem o fornecimento de gás a possíveis consumidores de porte, caso do Brasil e Argentina, as reservas andinas em nada contribuiriam para o desenvolvimento dos países que as possuem.

Entre as iniciativas para o fomento do uso de energéticos alternativos foi criado, em meados da década de 1980, o Plano Nacional de Gás Natural para Uso no Transporte (PLANGÁS). Este focava na substituição do óleo Diesel pelo gás natural. A inexistência de redes de distribuição de gás natural talvez tenha sido o fator que, no passado, mais tenha contribuído para o pequeno avanço do PLANGÁS. A crescente oferta de gás renova as pressões para a substituição do Diesel pelo energético alternativo. É importante distinguir que a realidade atual é distinta daquela de duas décadas atrás. Conta-se hoje com uma já expressiva, e em rápida expansão, rede de distribuição de gás canalizado.

1.1. O Consumo do Gás Natural em Motores

Existem no mercado internacional motores do ciclo Otto dedicados ao consumo do gás natural. Assim como no caso dos motores Diesel, estão disponíveis em uma larga faixa de potência e foram desenvolvidos para diferentes aplicações (como no caso dos para geração de energia elétrica e os veiculares). Suas emissões de poluentes são compatíveis com as exigências das legislações internacionais (Rabl, 2002; Ristovski, 2000). Apresentam, por limitação operacional (taxa de compressão), consumo específico de combustível (energeticamente) superior ao dos motores Diesel. É provável que, em um futuro próximo, e nas localidades onde o gás esteja disponível, sejam amplamente empregados nas aplicações hoje atendidas pelos tradicionais motores Diesel.

Dentre os fatores que inibem sua adoção imediata estão: a) elevado custo dos motores ciclo Otto – custam, para uma mesma potência e aplicação, entre duas e três vezes mais que os equivalentes a Diesel; b) apenas dois fabricantes nacionais produzem motores a gás do ciclo Otto: a Daimler Chrysler (Mercedes-Benz) e a General Motors *Powertrain*. Os motores Mercedes não têm montagem regular dada a demanda vacilante e atual baixa popularidade dos motores Otto a gás, comparada a dos tradicionais Diesel, junto aos usuários finais. Já a GM mantém no País linhas de montagem de motores 1,6, 1,8 e 2,4 litros para exportação. Motores de cilindrada baixa como estas não atendem as demandas da aplicação veicular em pesados ou as para geração de energia elétrica (a não ser no caso de pequenos grupos geradores, quase que portáteis, de uso em instalações de baixíssima demanda elétrica). Tem-se notícia de que a MWM – *International Engines* está testando em campo veículos pesados com protótipos de motor do ciclo Otto a gás (ônibus no transporte urbano do município do Rio de Janeiro). Estes, ainda em fase de desenvolvimento, não estão hoje disponíveis para comercialização. Redes para distribuição de peças de reposição e pessoal treinado na operação e manutenção dos motores Otto citados acima são, hoje, fundamentalmente inexistentes no País.

É razoável pensar no uso de motores do ciclo Otto em veículos e grupos geradores novos. Caso se pense no aproveitamento de curto prazo do gás natural devem-se fomentar as conversões dos veículos e grupos geradores Diesel hoje em campo. Dentre as tecnologias disponíveis para o uso do gás natural em motores Diesel existem: 1) adaptações de motores, originalmente Diesel, para operação no ciclo Otto com gás (“Ottorização”) e; 2) conversões de motores Diesel para o modo bicomcombustível Diesel / gás natural (Carvalho, 1985;

MacLean e Lave, 2003). Microturbinas a gás e células de combustível (a hidrogênio ou com reforma do gás natural), que também podem ter algumas aplicações, não deverão casar maturidade tecnológica e competitividade econômica suficiente a ponto de ameaçar os motores de combustão interna nos próximos anos (Golob et al., 1993; Ogden et al., 2004).

Na dita “Ottorização” grandes modificações dos motores, originalmente Diesel, são necessárias (Fontes e Fontes, 1995). Todo o sistema de injeção de óleo Diesel é retirado e, em seu lugar, instalam-se sistemas de carburação do gás ao ar de combustão e sistema elétrico com velas para a ignição, que passa a ser feita por centelha. Também são necessárias modificações nos cabeçotes dos motores para a adequação de sua taxa de compressão (motores do ciclo Otto trabalham com taxas de compressão inferiores a dos motores Diesel). Conversões de veículos acabam por também exigir ajustes no sistema de transmissão (Batista et al., 2004). Não são raras perdas de desempenho em um motor “Ottorizado”. Diferente de um motor originalmente desenvolvido para o funcionamento no ciclo Otto, motores “Ottorizados” podem vir a apresentar emissões de poluentes incompatíveis com as atuais legislações ambientais.

Uma vez “Ottorizado” um veículo ou grupo gerador passa a poder operar apenas por regiões já abastecidas pela rede de distribuição de gás. O repasse ou revenda destes motores para uma região que ainda não conte com o gás exigiria a reconversão para a configuração original Diesel. Embora apresente diversos inconvenientes, conhece-se o uso da tecnologia na Argentina. Este país, diferente do Brasil, já conta com extensa rede de distribuição de gás encanado. A necessidade da reconversão, nesta realidade, apresenta-se improvável. Restrições da legislação argentina quanto às emissões de poluentes não são tão severas quanto às brasileiras.

A operação bicomcombustível Diesel / gás envolve a carburação do energético alternativo ao ar de admissão de um motor Diesel (Karim, 1986). Fora a adição do sistema de mistura do gás natural ao ar nenhuma outra modificação de vulto é necessária ao motor. O sistema de injeção do Diesel permanece inalterado e é necessário para inflamar a mistura ar / gás. Para uma dada potência de eixo reduz-se o débito de Diesel pela injeção de gás. O combustível alternativo desloca, então, parte do Diesel originalmente demandado. Durante a operação bicomcombustível um motor consome, simultaneamente, tanto Diesel como gás natural. Existe a equivalência energética entre o litro de Diesel e o normal metro cúbico de gás natural (Pereira et al., 2004a). É possível operar motores Diesel / gás com consumo específico de combustíveis similar ao do

funcionamento original Diesel. Assim sendo, um motor Diesel que, por hipótese, antes de sua conversão, consumia 100 litros de Diesel por hora passaria a consumir 20 litros de Diesel por hora e 80 Nm³/h de gás natural, admitindo-se uma conversão a 80% de razão de substituição (Pereira e Braga, 2003).

A qualquer momento, inclusive com o motor convertido em funcionamento e sob carga, pode-se alternar entre a operação original Diesel e a Diesel / gás. Este fato permite que veículos convertidos para o modo Diesel / gás possam trafegar por regiões que ainda não dispõem de gás natural, simplesmente consumindo óleo Diesel. Ocorrendo a expansão da rede de gás natural encanado através do País, uma empresa transportadora poderia, por exemplo, progressivamente ampliar a área na qual seus veículos bicomcombustível consomem gás.

Existem na literatura resultados de testes em motores, todos originalmente Diesel, convertidos para a operação bicomcombustível com diversos outros combustíveis renováveis ou alternativos que não o gás natural (Bro e Pendersen, 1977). A metodologia da operação bicomcombustível, no ensaio de todos estes energéticos, sempre foi, basicamente, a mesma descrita acima para o caso da operação Diesel / gás natural. Para uma mesma rotação e potência de eixo se reduz o débito do Diesel pela carburação do energético alternativo (ou renovável) ao ar de admissão. Citam-se experiências envolvendo o uso do etanol (Ajav, 1998; Feitosa, 2003), metanol (Karim e Burn, 1980), biogás (Bari, 1996; Cheng–qiu et al., 1989; Henham e Makkar, 1998; Jawurek et al., 1987; Parikh et al., 1989), GLP (Karim e Burn, 1980) e hidrogênio (Gopal et al., 1982; Lambe e Watson, 1992; Patro, 1994; Rao et al., 1983; Yi et al., 2000), entre outros (Camargo, 1987; Karim e Burn, 1980).

O interesse pelo uso de energéticos alternativos e renováveis em motores varia conforme sua disponibilidade e custo relativo aos combustíveis tradicionais. É exatamente o que ocorre hoje no Brasil com a crescente oferta de gás natural. O metro cúbico do combustível, quando adquirido diretamente das distribuidoras de gás natural encanado, e tarifado para uso veicular ou geração de energia elétrica, custa, por unidade de energia liberada na queima, cerca da metade do valor praticado para o Diesel (Pereira *et al.*, 2005b).

1.2. Setores onde a conversão Diesel / gás pode encontrar aplicação

O setor de transporte rodoviário, seja o de transporte coletivo ou o de cargas, conta basicamente com veículos equipados com motores do ciclo Diesel.

A possibilidade da substituição, mesmo que parcial, do óleo pelo gás natural, constituiria uma opção interessante do ponto de vista nacional uma vez que nossa dependência do Diesel importado diminuiria.

Com o consumo do transporte rodoviário interurbano sendo hoje igual a 78,1 milhões de litros por dia (Fig. 2) e, adotando sobre este uma razão de substituição igual a 80%, estima-se que a possível demanda deste setor por gás como sendo de 62,5 milhões de Nm^3/dia . A região sudeste, que hoje já conta com redes de distribuição de gás natural encanado, concentraria a maior parte deste mercado (Braga e Pereira, 2004). O transporte coletivo urbano também requer volumes significativos de Diesel. A quantidade do derivado destinado a este setor é aproximadamente igual às importações brasileiras do combustível. As frotas de ônibus das maiores regiões metropolitanas do país (São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador, Belo Horizonte, Curitiba, Fortaleza, Manaus e Recife) hoje totalizam cerca de 120.000 veículos.

O Brasil conta hoje com uma frota de cerca de 1.800 locomotivas Diesel em uso (Pereira et al., 2004b). Estima-se que até 2010 mais 300 outras máquinas entrem em operação no País. Gastos com combustível constituem o maior item de despesa de qualquer ferrovia brasileira. O Diesel tipicamente responde por cerca de 30 – 40% do custo total da operação. Conversões Diesel / gás, ao disponibilizar um energético de menor custo para este setor, podem representar real oportunidade de ganho de competitividade das ferrovias dentro da cadeia logística. Cerca de 85% das locomotivas operando no país estão nas regiões sul e sudeste. Nestas já existem redes de distribuição de gás natural. A conversão destas 1.800 locomotivas, a uma razão de substituição Diesel / gás de 80%, resultaria em um incremento de 1,36 milhões de Nm^3/dia ao mercado de gás natural.

No norte do Brasil também se consomem volumes significativos de Diesel. Na região o derivado se destina fortemente tanto à geração termelétrica quanto ao setor de transportes (Pereira et al., 2004c), realizado fundamentalmente por via fluvial. Caso o gás natural de Urucu, segunda maior reserva nacional do energético, deslocasse parte do Diesel hoje destinado ao transporte fluvial, a logística de suprimento e distribuição do derivado líquido pela região norte seria amenizada. O mercado para o gás natural, em substituição parcial ao Diesel hoje empregado no transporte fluvial no Brasil, é estimado em 1,0 milhão de Nm^3/dia . É, portanto, pouco menor do que o existente no setor de transporte ferroviário.

Casado (2005) desenvolveu um sistema para conversão Diesel / gás para embarcações. Optou pela construção de um sistema mecânico, dada a robustez e simplicidade exigida do equipamento em campo. A especificidade desta aplicação, onde o motor sempre opera sobre a curva torque x rotação do hélice, resulta em uma estratégia simplificada para dosagem de gás e Diesel. Dos testes realizados com o sistema verificou-se operação com, aproximadamente, 80% de gás e 20% de Diesel. O consumo específico de combustíveis do motor convertido mostrou-se inferior ao anteriormente verificado na operação Diesel.

A potência unitária dos geradores Diesel, se comparada a das grandes usinas termelétricas ou hidráulicas, tipicamente não é grande. Deve-se, entretanto, ponderar que o número de unidades instaladas é expressivo e que, em conjunto, respondem por uma fração significativa da potência total das usinas térmicas instaladas no País. Apenas as usinas Diesel hoje autorizadas a fornecer energia elétrica à rede respondem por cerca de 25% da potência total do parque termelétrico brasileiro (Brasil, 2002a). Normalmente este potencial fica ocioso (Brasil, 2002c) devido ao custo do óleo Diesel. Seu consumo na geração contínua de energia elétrica não compete economicamente com outros energéticos. O uso do Diesel se justifica apenas em situações especiais, como no caso das eventuais interrupções de fornecimento, horários onde a demanda por potência é grande e em localidades distantes da rede elétrica.

A possibilidade do consumo de gás natural, energético de preço atraente, nos geradores Diesel atualmente instalados constitui uma oportunidade interessante (Cârdú e Baica, 2003; Söderholm, 2000). A conversão das máquinas a Diesel existentes para o gás natural representaria um grande aumento na oferta de energia elétrica já que estes, consumindo o energético de baixo custo, poderiam operar continuamente e não mais ocasionalmente como hoje. O esforço para o fornecimento desta potência adicional à rede seria mínimo já que, em estando o gás disponível, apenas a conversão dos motores se faria necessária. Não seriam exigidas modificações nas ligações, já existentes, destes equipamentos com a rede elétrica ou pesados investimentos em novas usinas.

Pequenos geradores de energia representam um segmento onde o gás natural também pode ser empregado. Estes se encontram tanto na indústria como no comércio e, tipicamente, também permanecem ociosos durante grande parte do tempo. Citam-se, como exemplo, as instalações existentes em hospitais, hotéis e *shoppings*. Considerando que hoje as figuras do produtor independente e do autoprodutor de energia elétrica estão bem definidas, os proprietários de grupos geradores poderiam, tendo a possibilidade da conversão

de seus motores para o gás natural e acesso ao energético alternativo, usufruir da eletricidade produzida a baixo custo em seus equipamentos.

É importante notar que, pelo uso do gás natural, diversos consumidores podem produzir sua própria eletricidade a um preço significativamente inferior a da comercializada pelas concessionárias de força e luz. Consumidores de energia em baixa tensão são aqueles onde a tecnologia encontra atratividade elevada. Podem, consumindo gás natural, produzir sua energia elétrica a 50 – 60% do valor praticado pelas concessionárias de força e luz (Pereira et al., 2005b). Tipicamente consomem energia em baixa tensão estabelecimentos comerciais e o setor residencial.

Consumidores de energia em alta tensão, em especial os industriais, também podem ter interesse na autoprodução de eletricidade. O faturamento da energia fornecida em alta tensão considera não apenas o consumo (como é o caso dos consumidores em baixa tensão). Também são fatores importantes na composição do custo da energia comercializada em alta tensão a máxima potência instantânea demandada, assim como o horário do dia, dia da semana e mês do ano em que o consumo é realizado (período seco ou úmido). De uma forma geral a energia comercializada em alta tensão tem custo inferior a da que se pode produzir, mesmo pelo consumo do gás natural. Considera-se aqui que o custo do gás é aquele hoje praticado pelas distribuidoras de gás, faturado para geração de eletricidade. Em tendo os consumidores finais acesso ao gás pelo baixo custo ofertado, em passado recente, às termelétricas emergenciais, a atratividade pela autoprodução seria significativamente incrementada.

Consumidores em alta tensão são, entretanto, também sujeitos a tarifa de horário de ponta. Este é um período de três horas diárias, contabilizadas nos dias úteis, em que o custo da energia fornecida é extremamente alto. O elevado custo da energia neste período tem como intuito minimizar o consumo em tal horário, i.e., resguardar o sistema de geração e transmissão de picos de potência. Cabe às concessionárias de força e luz definir o horário em que este intervalo de três horas é válido. No caso do estado do Rio de Janeiro o horário de ponta foi definido como o compreendido entre 17:30 e 20:30 h.

O custo da energia no horário de ponta é tão elevado que justifica mesmo a autoprodução a Diesel. É, portanto, comum o fato de que hoje consumidores em alta tensão produzam sua própria eletricidade, durante as três horas diárias do horário de ponta, com grupos geradores Diesel. O uso do gás natural, em substituição parcial ao Diesel, pode contribuir para a adicional redução de custos com energia também para os consumidores de eletricidade em alta tensão.

Nota-se que, com a presente disponibilidade de hidroeletricidade, as concessionárias de força e luz têm por iniciativa própria ofertado energia com reduções de tarifa em horário de ponta para consumidores que investiram na autoprodução. Tipicamente esta tarifa reduzida tem custo comparável a da geração a Diesel. Consumidores finais mantêm, assim, a remuneração do investimento feito em grupos geradores mesmo com suas máquinas paradas. O consumo do gás natural, energético de baixo custo, nestes grupos geradores renovaria o poder de “barganha” de consumidores finais junto as concessionárias de força e luz.

O uso do gás natural na geração termelétrica no norte do Brasil (hoje fortemente concentrada em Manaus) pode ser uma opção interessante. Esta região não faz parte do sistema elétrico interligado que atende o restante do País. Toda a geração de eletricidade de lá é hoje feita em geradores Diesel (ou a óleo combustível). Com o término da construção do gasoduto Coari – Manaus, o gás natural de Urucu poderia ser utilizado na geração de energia daquela localidade, nos grupos geradores do ciclo Diesel hoje já existentes e em operação (Pereira et al., 2005a). Ressalta-se que as tarifas praticadas pela energia elétrica na região norte são compatíveis com as do restante do Brasil. O custo adicional da geração termelétrica, pelo consumo Diesel na região, é subsidiado. Os recursos para tal vêm do rateio dos gastos com combustível, no norte, pelos consumidores abastecidos pelo sistema interligado. A substituição do Diesel pelo gás natural, de baixo custo, produzido na própria região norte poderia inclusive promover reduções nas tarifas de energia em todo o país.

Diversos combustíveis alternativos ou renováveis têm sido propostos para a substituição, parcial ou integral, do Diesel em motores. Acredita-se que estes encontrem, dentre as muitas aplicações dos motores Diesel, aquelas em que naturalmente melhor se adaptem. Parece ser razoável admitir que o uso do gás natural, em motores convertidos para a operação Diesel / gás, seria mais racional quando destinado para a geração de energia elétrica. Motores estacionários não requerem, como na aplicação veicular, cilindros de armazenamento de gás comprimido. O volume de gás, mesmo quando demandando por uma pequena usina termelétrica (300 – 600 kW), já justifica a construção de um pequeno ramal na rede de distribuição de gás encanado para seu atendimento.

Acredita-se que, pela fácil logística de distribuição e abastecimento de combustíveis líquidos, seja conveniente investir esforços no desenvolvimento de energéticos alternativos ou renováveis líquidos para uso nos motores Diesel de

uso automotivo. Tecnologias que permitam aos usuários finais alternar entre o uso de energéticos tradicionais e os renováveis ou alternativos devem, sempre que possível, ser consideradas. Em períodos de modificação da matriz energética a flexibilidade operacional garante, enquanto a cadeia de produção e abastecimento dos novos energéticos amadurece, sua introdução gradual com mínimo impacto sobre os consumidores finais.

O gás natural, mesmo não possuindo apelo ambiental forte como o do etanol ou biodiesel, não deve ser deixado de lado. É um recurso natural, de baixo custo, e com oferta crescente no País. Pode contribuir para a redução de nossa dependência do derivado importado ou, em um cenário otimista, até mesmo possibilitar excedentes do Diesel produzido em nossas refinarias. Deve-se mais uma vez frisar que este energético é comercializado no mercado internacional a preço bastante superior ao praticado no Brasil para o gás natural (Pereira *et al.*, 2005b).

1.3. Objetivos

A operação Diesel / gás natural já foi investigada por diversos grupos de pesquisa. Iniciativas passadas focaram na determinação do desempenho de motores bicompostível em laboratório (Bet, 1991; Lastres, 2003; Silva, 1995), em conversões para aplicações específicas (Casado, 2005; Lastres e Maia, 1986; Pruzaesky, 2005), na simulação numérica da operação Diesel / gás (Becerra, 1996; Bi e Agrawal, 1998; Mansour *et al.*, 2001) e na análise de viabilidade do uso do energético alternativo (Lima, 2004; Painuly e Parikh, 1993).

Há na literatura dados experimentais relativos à operação Diesel / gás natural de diversos motores. Motores mono-cilindro, de pequena cilindrada e baixo consumo de combustível, foram usados na maioria dos estudos experimentais. Alguns trabalhos apresentam resultados obtidos em testes de motores de maior porte (Lastres e Maia, 1986; Checkel *et al.*, 1993; Pereira *et al.*, 2004). O uso destes resultados na estimativa do desempenho de um motor ainda por converter não é, entretanto, imediato.

São dois os objetivos do presente trabalho:

- Levantar dados empíricos de diferentes motores que, uma vez correlacionados, permitam estimar o desempenho de motores Diesel

ainda não testados ou dos quais não se disponha de dados operacionais prévios.

- Propor correlações semi-empíricas que permitam estimar o desempenho de motores, originalmente Diesel, quando consumindo gás natural.

Será apresentado que existe, por todos os campos de operação, rotação x torque de diferentes motores, fundamentalmente uma única e bem definida relação entre os consumos de Diesel, gás natural e ar.

1.4. Atividades desenvolvidas e organização da Tese

Quatro diferentes motores, todos operando sob variadas razões de substituição de Diesel por gás natural, foram testados em dinamômetro de bancada. Tais motores foram selecionados com o intuito de serem modelos representativos das diferentes configurações tipicamente encontradas em campo (faixa de rotação, uso ou não da turbo-alimentação e arrefecimento do ar de combustão). Os dados levantados nos testes destes quatro motores foram empregados na proposta de correlações empíricas a serem utilizadas na estimativa do desempenho de motores, originalmente Diesel, quando operando no modo Diesel / gás.

Paralelamente à tomada das medidas em laboratório citadas acima também se procedeu, durante o período de execução da presente tese, a conversão de três geradores de energia elétrica para o funcionamento no modo Diesel / gás natural. Os três contavam com motores turbo-alimentados e arrefecimento do ar de combustão. Embora todos operassem sempre a 1.800 rpm, condição indispensável à produção de eletricidade em 60 Hz em alternadores de quatro pólos, tinham porte (cilindrada e potência máxima) variando por uma ordem de grandeza (de 5,99 litros, 212 hp até 46 litros, 1.570 hp). De forma distinta das medidas tomadas em dinamômetro de bancada as conversões destes geradores foram feitas em campo, com instrumentação insuficiente e com prazos apertados para a medida cuidadosa e metódica de todos os parâmetros de interesse. Os dados verificados nas conversões destes três grupos geradores, quando considerados adequados, foram comparados aos obtidos em dinamômetro de bancada.

A instrumentação destinada à medida das emissões de motores a combustão, disponível no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV/PUC–Rio) na ocasião do desenvolvimento do presente trabalho, era modesta. Nos quatro motores ensaiados em dinamômetro de bancada foram tomadas medidas associadas apenas às emissões de poluentes particulados (opacidade e fumaça). Assim sendo, trata-se aqui apenas das emissões deste poluente. Tem-se a indicação, com base nas medidas de desempenho, de que as emissões de outros poluentes, também regulamentados (rigidamente no caso dos motores de uso veicular / rodoviário), por vezes estivessem em níveis condenáveis.

Hoje o grupo de pesquisa do LEV/PUC–Rio já conta com instrumentação capaz de determinar as emissões de um maior número de poluentes, incluídos aí os previstos pela legislação brasileira na aplicação automotiva de motores Diesel. A linha de pesquisa segue dando atenção, agora não apenas ao desempenho, mas, também, às emissões de motores Diesel / gás natural. Fica a cargo dos futuros autores tratarem desta importante questão, desenvolvendo metodologias que minimizem emissões, e confrontando seus resultados aos reportados por outros grupos de pesquisa (Abd–Alla, 2002b; Abd–Alla et al., 2001; Kusaka et al., 2000; Liu et al., 2001; Matros et al., 1999; Selim, 2001; Selim, 2003a; Tesarek, 1983).

No capítulo dois do presente trabalho faz-se a revisão bibliográfica do tema. Resultados experimentais da operação bicomcombustível, levantados por diferentes autores, com diversos combustíveis alternativos ao Diesel, são discutidos. São qualitativamente comparados utilizando-se os fundamentos da combustão em motores e à experiência acumulada, ao longo do presente trabalho, com a operação Diesel / gás natural. Valores típicos dos parâmetros operacionais relevantes, sempre que conveniente, são citados.

O equacionamento do desempenho de motores é apresentado no capítulo três. Neste também se propõe um modelo simplificado para a combustão Diesel / gás em motores. Tanto no equacionamento do desempenho quanto na modelagem da combustão surgem parâmetros que, invariavelmente, devem ser determinados de forma empírica. Correlações para tais parâmetros são, com base nos resultados dos ensaios realizados, propostas no capítulo seis. Neste também são discutidos e comparados os resultados obtidos nos testes dos diversos motores avaliados.

No capítulo quatro descrevem-se o aparato experimental empregado, os detalhes construtivos dos motores testados e a metodologia adotada na realização dos ensaios. No capítulo cinco se apresenta o equacionamento

empregado na redução de dados e cálculo das variáveis de interesse. Também inclui a análise das incertezas experimentais e sua propagação no cálculo das grandezas de interesse.

A presente tese é concluída com o capítulo sete. Neste se resumem os principais resultados e se pondera sua aplicabilidade face às limitações experimentais enfrentadas. Buscou-se, sempre que possível, varrer as mais amplas faixas possíveis das variáveis com influência no desempenho de motores. Alguns parâmetros, entretanto, não foram alterados. Foi o caso, por exemplo, da taxa de compressão dos motores ensaiados.