

2

Breve Histórico do uso de Laser para Perfuração e Canhoneio de Rocha

2.1.

Tecnologia Laser

Laser é um dispositivo que produz radiação eletromagnética apresentando características especiais no feixe de luz coerente, pois todas as ondas dos fótons que compõem o feixe estão em única fase, colimada devido a sua propagação como um feixe de ondas praticamente paralelas e monocromáticas, em função de possuir comprimento de onda bem definido.

Desenvolvido na década de 1960, o laser era uma tecnologia que não teve aplicação imediata. Hoje, o laser tem inúmeras aplicações na vida cotidiana. Os tipos de laser existentes na indústria são classificados quanto ao tipo de fonte, natureza da emissão e comprimento de onda como apresentado na Figura 4.

O Laser pode ser classificado quanto ao tipo de excitação utilizada para desencadear o processo, com base nas fontes como, laser de sólido, laser a gás, lasers semicondutores, laser de elétrons livres e laser de bombeio nuclear (Graves, 1998).

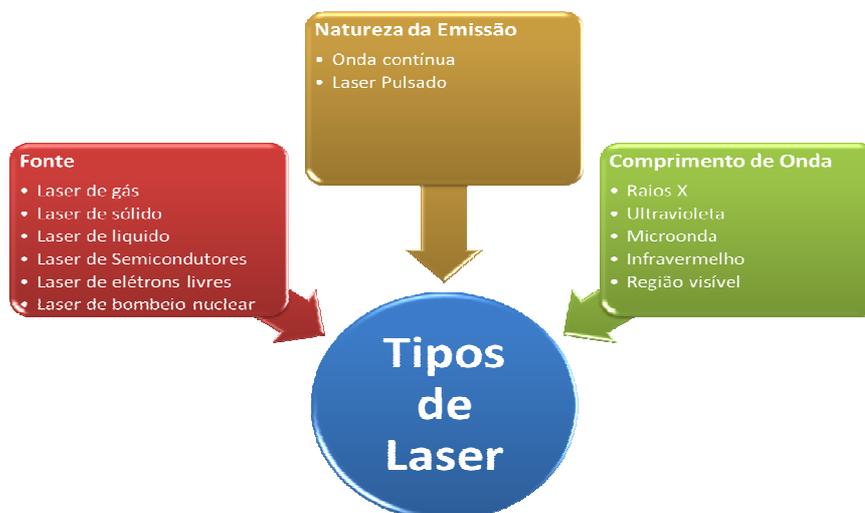


Figura 4 – Diagrama de classificação dos tipos de laser
Fonte: O Autor (2013).

4. Laser Químico Avançado de Infravermelho (MIRACL)
5. Laser de Fibra de Alta Potência (HPFL)
6. Laser de Monóxido de Carbono (CO)
7. Laser de Criptônio Flúor (KrF)
8. Laser de Elétrons Livres (FEL)
9. Laser de Diodo
10. Laser de Fluoreto de Hidrogênio e Fluoreto de Deutério (Bazargan *et al.*, 2012).

2.2. Interação Laser-Rocha

Ao término da guerra fria o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, através de acordos cooperativos com os militares, liberou o acesso às pesquisas desenvolvidas com laser para a comunidade científica mundial. Após este período de desenvolvimento de estudos com objetivos militares, a indústria de petróleo dos EUA, demonstrou um grande interesse na aplicação das tecnologias a laser desenvolvidas para a perfuração de poços de petróleo, com o objetivo de melhorar a eficiência do processo de perfuração, canhoneio e estimulação.

A possibilidade da aplicação do laser como um método alternativo para cargas explosivas convencionais poderia restaurar os danos da perfuração e aumentar significativamente as taxas de produção, gerando retorno econômico com a produção acumulada (Snider, 2000).

Para fraturar uma rocha com aplicação de laser, seja por indução de esforços mecânico e/ou térmico, deve ser aplicada uma potência suficiente à rocha para exceder o limite de fratura. Quando o mecanismo que prevalecer sobre a rocha for térmico, será necessária uma quantidade suficiente de calor para exceder a temperatura de fusão da rocha.

No momento em que estes valores limites de energia e potência são excedidos, a quantidade de energia necessária para fraturar ou remover uma unidade de volume de rocha permanece quase constante.

Este parâmetro de energia, que é uma medida da eficiência da técnica de destruição térmica da rocha, definido como a energia específica (*SE*). Em resumo,

a energia específica (SE) é a quantidade de energia necessária para remover o volume de unidade de rocha (Gahan *et al.*, 2001).

$$SE \text{ (J / cm)} = \text{entrada} / \text{volume de energia removida} \quad (1)$$

$$SE = \frac{\text{Energia aplicada}}{\text{Volume removido}} = \frac{E}{\frac{dV}{dt}} = \frac{kW}{\frac{cm^3}{s}} = \frac{kJ}{cm^3} \quad (2)$$

Existem três fenômenos básicos no processo de transferência de energia radiante para sólidos: reflexão, espalhamento e absorção da radiação, sendo então fluxo de energia de uma onda eletromagnética incidente (E_{inc}) é dividido em três partes:

$$E_{inc} = E_{refl} + E_{SC} + E_{ABS} \quad (3)$$

Onde E_{refl} (energia refletida), E_{sc} (energia espalhada), e E_{ABS} (energia absorvida) são frações do fluxo de energia da onda incidente. Estes parâmetros afetam a medida da energia específica.

A energia absorvida dá origem ao aquecimento da rocha e destruição. A reflexão e o espalhamento representam perdas de energia que ocorrem além da absorção energia.

Em uma superfície lisa, como um espelho, a maior parte da energia é refletida, sendo esta determinada pela composição do sólido. Numa superfície áspera ocorre principalmente uma dispersão da radiação incidente, determinada pelo comprimento de onda (λ).

Minimizando as frações refletidas e espalhadas as perdas de energia irão, conseqüentemente, maximizar a energia disponível para ser transferida no processo de destruição da rocha.

Os quatro mecanismos básicos aplicados em processos de escavação de túneis e perfuração de poços para desintegrar e remover uma rocha: fragmentação térmica, fusão e vaporização, tensões mecânicas e reações químicas, são apresentados na Figura 6. Na aplicação de novas soluções tecnológicas como lasers, os mecanismos predominantes no processo de perfuração são a fragmentação térmica, a fusão e a vaporização.

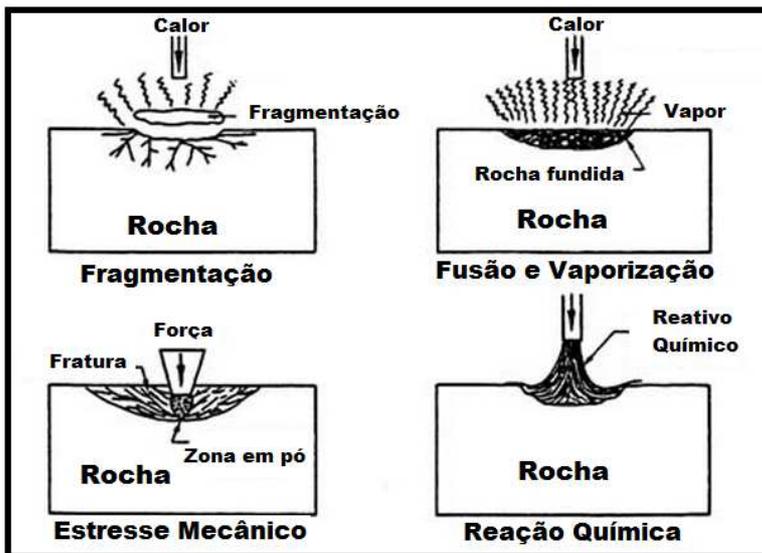


Figura 6 – Mecanismos básicos para desintegração e remoção de uma rocha
Fonte: Maurer (1980).

A fragmentação térmica (Spallation), apresentada na Figura 6, foi relatada por William como o processo mais eficiente para a perfuração da rocha. A aplicação da fragmentação térmica induz um esforço térmico na rocha que atua na sua compressão, fragilizando a mesma gerando pedaços (Spall) da rocha que são removidos do corpo sólido permitindo assim a continuação do processo de criação do túnel (Maurer, 1980).

A energia específica necessária para a perfuração de um poço será inversamente proporcional à energia de estresse mecânico requerido (ROP).

$$ROP = \frac{P_c}{SE} = (cm/s) \quad (4)$$

Neste tipo de mecanismo de perfuração podem-se observar vários efeitos, como o aumento da permeabilidade e da porosidade, sendo que o aumento da permeabilidade depende da condutância térmica da formação a ser perfurada. Os experimentos realizados por vários pesquisadores demonstraram que o maior aumento da permeabilidade foi observado nos arenitos em comparação aos folhelhos e carbonatos (Batarseh, 2003).

2.2.1. Energia Específica Carbonato Bege Bahia

No laboratório de laser do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RIO foram realizadas medições dos valores da energia específica do carbonato bege bahia. A Tabela 1 demonstra a variação dos valores de energia específica para uma faixa de variação da potência de 400 a 1200 W, indicando que quanto maior a potência aplicada menor será a energia específica necessária (Salehi, Gahan & Batarseh, 2007).

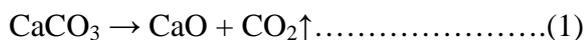
Tabela 1 – Energia específica do carbonato bege bahia

Carbonato Bege Bahia	
Potência (W)	Energia específica (J/mm ³)
400	160,00
600	120,00
800	40,00
1000	25,00
1200	24,00

Fonte: cortesia Luis Felipe Orlando Gama - PUC-RIO (2013).

2.2.2. Energia Específica Carbonato Travertino

Na interação do carbonato (CaCO₃) com o laser ocorre somente a dissociação térmica, produzindo óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂), conforme equação 1.



Salehi *et al.* (2007) realizou uma avaliação da variação da energia específica em função da potência do laser demonstrada no Gráfico.

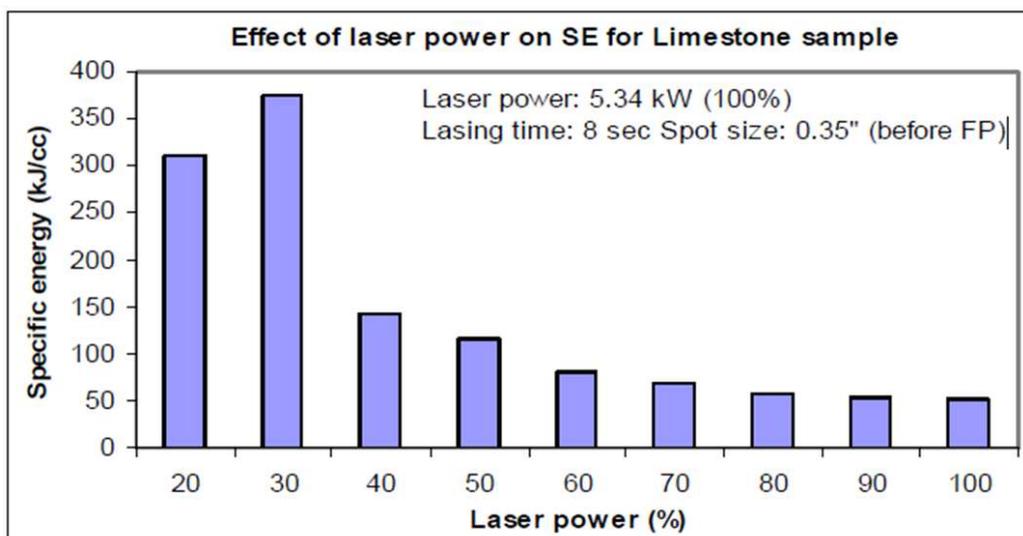


Gráfico 1 – Efeito da potência do laser na energia específica do carbonato
 Fonte: Salehi *et al.* (2007).

2.3. Histórico da aplicação de Laser

As técnicas de perfuração de solos e rochas aplicadas aos diversos processos de lavra baseiam-se em sistemas mecânicos e apresentam limitações que estimulam a busca por alternativas mais vantajosas que ofereçam, entre outras características, a redução de vibração, a possibilidade de perfurar maiores diâmetros com maior precisão, o aumento e otimização da taxa de penetração e a possibilidade do monitoramento on-line de propriedades geometalúrgicas e geomecânicas (Freedonia Group Inc, 2008; Koppe, 2007; Kurcewicz, 2004).

Apesar das primeiras propostas de utilização de lasers para perfuração de rochas e solos datarem da década de 70 (Salisbury & Stiles, 1976, 1978; Sinha & Gour, 2006), a tecnologia começou a tornar-se viável somente no final dos anos 90 quando foram disponibilizados para a indústria lasers de alta potência desenvolvidos no contexto do programa *Strategic Defense Initiative* conduzido nos Estados Unidos ao longo dos anos 80 pelo governo do Presidente Ronald Reagan (Fitzgerald, 2001; Graves & O'Brien, 1999).

Um desses projetos foi desenvolvido pelo GRI (*Gás Reserch Institute*) que em 1997 patrocinou um projeto de pesquisa básica por um período de 2 anos, visando a otimização do processo de perfuração e completção de poços de gás natural. A linha de pesquisa desenvolvida examinou a viabilidade da aplicação das

tecnologias a laser desenvolvidas pelo Departamento de Defesa dos USA no projeto *StarWars technologies*.

Na segunda fase do projeto, em 1999, o (GRI) *Gás Research Institute*, apresentou os resultados dos testes realizados com o laser de alta potência, onde foi aplicado o Laser químico de oxigênio-iodo (COIL), inventado pela Força Aérea dos EUA, em 1977, para a defesa ar-ar. Foram testadas com raios laser de diferentes potências e tempo de aplicação mais de 100 amostras de rochas constituídas de arenitos, calcários, folhelhos, sal, granitos e concreto e realizada pesquisa básica com foco na interação rocha fluido. Os resultados demonstraram a viabilidade do laser penetrar em todos os tipos de rochas. As amostras saturadas com água, solução salina, óleo e gás foram também testadas para simular mais precisão o ambiente de perfuração de poços (Graves & O'Brien, 1999).

No entanto, foi somente a partir dos últimos anos que novos desenvolvimentos na área de fotônica começaram a possibilitar a utilização de lasers para perfuração de solos e rochas fora do ambiente de laboratório [Hallada, Walter & Seiffert, 2000; Graves *et al.*, 2000, Gahan *et al.*, 2004; Mustafiz, Bjorndalen & Islam, 2004, Saggaf, 2008; Kobayashi *et al.*, 2009; Kurawle *et al.*, 2009; Albert *et al.*, 2009]. Estes avanços são especialmente significativos na tecnologia de fibras ópticas e de lasers compactos de alta potência [Galvanauskas, 2004; Nilsson *et al.*, 2005; Tünnermann *et al.*, 2005; Limpert *et al.*, 2006; Dawson, 2008].

Em 2001, no GTI (Gás Technology Institute), foram realizados experimentos da interação laser com a rocha, em amostras de arenito, rocha calcária, e folhelho, que foram preparadas para interagir com o laser Nd YAG pulsado com uma potência de 1,6 kW. O objetivo foi determinar os parâmetros que podem afetar a quantidade de energia transferida para a rocha; Tais como a energia específica, o diâmetro do feixe de energia, a frequência de repetição, o comprimento de onda, o tempo de exposição, com a finalidade de se remover um volume máximo da rocha a partir das amostras, enquanto se minimiza a entrada de energia (Gahan *et al.*, 2001).

A partir de 2001, a indústria do laser passou a oferecer os lasers de fibra como uma alternativa aos lasers de dióxido de carbono e de estado sólido para aplicação do processamento de materiais industriais. Neste período, relativo aos últimos dois anos, os lasers de fibra, disponíveis no mercado, aumentaram, em

potência, de vários watts para kilowatts. Os lasers já seriam capazes de transmitir com eficiência, através da fibra ótica a energia necessária para atingir os objetivos em fundo de poço. Por esta razão, tornaram-se rapidamente principais candidatos nas aplicações em perfuração e completação de poços.

Quando comparado com lasers industriais convencionais, os lasers de fibras oferecem uma ordem de magnitude maior da eficiência, melhora da qualidade do feixe, aumento da mobilidade em face da redução de tamanho, e essencialmente, facilitam manutenção durante a sua vida útil.

A possibilidade da aplicação como um método alternativo para cargas explosivas convencionais poderia reduzir ou eliminar os danos do canhoneio e aumentar significativamente as taxas de produção, gerando retorno econômico com a produção acumulada (Gahan *et al.*, 2004).

Hoje, várias tecnologias de lasers baseadas em semicondutores, a fibra ótica: em gás ou a cristal, se mostram maduras o suficiente para este tipo de operação. Além disso, a evolução tecnológica das fibras óticas possibilitou o desenvolvimento de guias óticos que suportam as altas densidades de energia necessárias para a perfuração.

As potenciais vantagens da perfuração a laser sobre os métodos tradicionais são:

- Aumento da eficiência de perfuração e canhoneio. Experimentos em laboratório demonstram que com o uso do laser, dependendo do material perfurado e das condições de perfuração, pode-se conseguir taxas de penetração de 10 a 100 vezes maiores do que as obtidas com as técnicas convencionais (Argone National Laboratory, 2010);
- Redução no número de partes mecânicas móveis presentes no sistema de perfuração;
- Monitoração “in situ” do material perfurado, por exemplo, através da técnica de espectroscopia induzida por laser (Rusak, 1997; Pasquini, 2007; Bolger, 2000);
- Capacidade de perfurar diferentes materiais (rochas com diferentes composições, metais, etc.) sem a necessidade de substituir a broca; dependendo do material a ser perfurado, diferentes comprimentos de onda

da luz laser podem ser acionados para aumentar a eficiência da perfuração, ou ainda diferentes regimes de operação podem ser utilizados, como contínuo ou pulsado etc.;

- Redução de custos com manutenção;
- Menores dimensões e peso do sistema de perfuração;
- É possível manter maior controle da profundidade, diâmetro e direção de perfuração obtendo geometrias de desmorte mais precisas;
- Aumento da resistência mecânica das paredes do poço perfurado, de acordo com a constituição mineralógica dos tipos de rochas perfuradas, mediante vitrificação da superfície do furo; na perfuração de poços de petróleo, é razoável especular sobre redução da necessidade de revestimento durante a perfuração.

Uma primeira busca de patentes até 2008, identificou diversas patentes norte-americanas, pelo menos quatorze desde o final dos anos 70 propõem métodos de perfuração a laser para diferentes aplicações (Patentes US 3,977,478, 3,998,281, 4,066,138, 4,090,572, 4,113,036, 4,199,034, 6,365,871, 6,626,249, 6,755,262, 6,870,128, 6,880,646, 6,888,097, 7,416,258 e 7,487,834). Importa ressaltar que mesmo nas invenções que propõem a utilização de fibra(s) óptica(s) para entregar luz laser de alta intensidade em regiões de fundo de poço, não houve nenhuma demonstração prática desta possibilidade quando considerados longos trechos de fibra (poços profundos, i.e. extensões iguais ou superiores a 2500 metros). A principal razão para isso é a indução de fenômenos não lineares durante a propagação de luz laser de alta intensidade por longos trechos de fibra. Este problema é clássico dentro da óptica guiada e muitos grupos de pesquisa e empresas têm dedicado esforços para reduzi-lo ou eliminá-lo (Mendes & Morse, 2007).

Por outro lado, entre as várias tecnologias de lasers, os lasers à fibra óptica, onde a luz laser de alta intensidade é gerada dentro da própria fibra, apresentam enorme potencial para a aplicação proposta. Este tipo de laser é compacto e, geralmente, não requer refrigeração mesmo quando operando com altas potências (\geq kW). Ademais, as perdas por acoplamento da luz na saída do laser, com fibra

óptica condutora são mínimas uma vez que se trata de acoplamento fibra-fibra e não espaço livre-fibra.

No que tange ao comprimento de onda da luz laser, observa-se a disponibilidade comercial de sistemas laser de alta potência com comprimentos de onda variados (do ultravioleta ao infravermelho), dependendo do elemento ativo e do projeto da cavidade laser, e lasers com comprimento de onda sintonizável. Isto significa que, dependendo do material da superfície a ser perfurada, é possível utilizar comprimento de onda de perfuração que coincida com a banda de absorção deste material, aumentando significativamente a eficiência do processo. Assim, durante a perfuração é possível selecionar em tempo real o comprimento de onda da luz laser mais adequado para a superfície. Esta é outra vantagem tecnológica da perfuração a laser em relação a sistemas mecânicos convencionais.

Apesar do grande interesse e dos avanços alcançados ainda não há produtos disponíveis no mercado. Um exemplo de esforço realizado foi o projeto encabeçado pelo *Argonne National Laboratory (Laser Applications Laboratory)* (Argonne National Laboratory, 2010), em parceria com a *Colorado School of Mines* e a *Parker Geoscience Consulting*. Atualmente, a *Foro Energy* desenvolveu um processo que utiliza o laser para destruir rocha e componentes convencionais de broca mecânicas para remover a rocha. Este processo de perfuração mecânico-laser permite a mudança na taxa de perfuração (de 2 a 4 vezes maior), redução do peso sobre broca (<1000 lbs), torque baixo (<300 ft-lbs), aumento do tempo de vida da broca e redução no custo de perfuração por metro (Foro Energy, c2013).

A tecnologia de perfuração a laser vem sendo estudada no Brasil pela PUC-Rio desde 2008. As primeiras demonstrações da tecnologia em laboratório no Brasil já foram realizadas com um laser de CO₂. Uma primeira patente protegendo a tecnologia foi depositada no INPI no final de 2008 [36] e no PCT em 2009 (Pedido Internacional no PCT/BR/2009/000405). Esta patente descreve um sistema a laser para a perfuração de rochas, compreendendo uma broca óptica dotada de sensores que determinam parâmetros do processo de perfuração e enviam essas informações a um centro de controle e operação, este sendo conectado a um sistema de refrigeração e retirada de resíduos, bem como a uma fonte de energia. O sistema de perfuração possui capacidade de efetuar a perfilagem das propriedades físico-químicas e mecânicas do material do poço perfurado através de uma técnica de espectroscopia induzida por laser. Uma

segunda patente (Braga & Martelli, 2008) protegendo um desenho da broca óptica, incluindo a geometria dos lasers a fibra embarcados, que permite a refrigeração do sistema, a remoção de material perfurado e o controle da direcional da perfuração.

Neste momento singular, onde os preços de perfuração são alavancados pela ineficiência dos métodos tradicionais em operar em condições cada vez mais severas, os lasers de alta potência e as fibras ópticas atingem um nível de maturidade sem precedentes. Visualiza-se a oportunidade de desenvolver soluções inovadoras que irão gerar produtos para o mercado de perfuração, canhoneio e estimulação.

2.3.1.

Histórico de aplicação de Laser para operações de canhoneio

Na completação de poços de petróleo e gás, é necessária a criação de um caminho para que óleo do reservatório possa fluir para dentro do poço. Túneis de comunicação entre o poço e o reservatório são criados através operações de canhoneio, que consistem em descer um canhão (cilindro de aço com furos no qual se alojam as cargas explosivas) dentro do poço até a profundidade correspondente ao reservatório. Após o posicionamento do mesmo frente ao intervalo de interesse, são disparadas as cargas explosivas, gerando túneis que atravessam o revestimento, o cimento e formação rochosa na zona de produção, permitindo assim que o fluido da formação possa ser escoado para dentro do poço.

O propósito de utilizar o canhão a laser como ferramenta para produzir canhoneio nas rochas carbonáticas é aperfeiçoar o processo de canhoneio e reduzir problemas tais como precisão e exatidão na geometria, profundidade do furo e dano à formação, visto que o laser pode ser aplicado para canhonear a rocha, em substituição à técnica de canhoneio tradicional, com a possibilidade de manter uma geometria constante e não danificar o reservatório como visto na Figura 7.

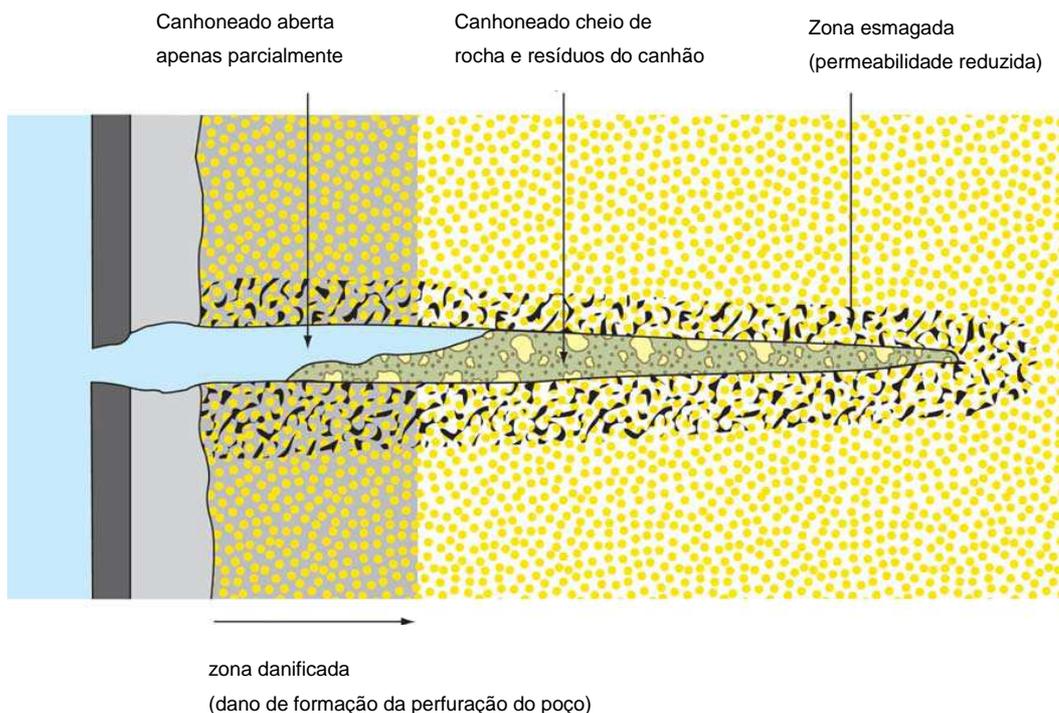


Figura 7 – Formação de dano no canhoneio [Well completion Designer]
 Fonte: Jonathan Bellarby. (2009).

Em 2002, com o objetivo de identificar a possibilidade de correspondência entre a interação rocha-laser e os parâmetros de processamento do laser, testes foram realizados variando o foco de feixe sobre a rocha. Um grupo de corridas lineares foi produzido movendo-se a amostra sob um o foco do feixe de luz com variação da posição focal de 0,5 mm a 20 mm, movendo-se a lente para cima e afastando-se em relação à rocha. Utilizou-se a energia por pulso que variou de 2 a 32J/pulso com a repetição da faixa de 50 a 800 Hz; o pico de potência de 4 a 16 KW e o pulso de 0,5 a 2 ms. Com uma faixa de potência calculada em 1600 W para este teste, foi observada uma larga perda de potência: entrega mensurada entre 686 e 1300 W. A diferença no fornecimento foi devida à perda na fibra ótica usada naquela época (Figuerola *et al.*, 2002).

Historicamente, no avanço técnico de projeto de versões de baixo consumo de energia, os lasers de fibra foram usados como amplificadores de sinais ópticos na indústria de telecomunicações. Configurações com alta potência, teoricamente, foram disponibilizadas e comercializadas a partir de 2001. Desde que o projeto fosse viável, lasers de fibra estariam disponíveis com potências de saídas próximos a 10 KW dentro de um ano (Gahan *et al.*, 2005).

A operação de canhoneio é conduzida na zona de produção, normalmente posicionada a milhares de metros de profundidade no poço. Por exemplo, no pré-sal da bacia de Santos o reservatório pode ser encontrado, a 6000 m aproximadamente. Isto exige que o feixe de laser seja conduzido através de longas distâncias sem grande perda de transmissão da potência. Até o presente momento, a fibra ótica é a única tecnologia com potencial de flexibilidade para fornecer um feixe de energia de alta potência em longa distância com menor perda de potência, (Xu *et al.*, 2004).

Em 2004, na busca por tecnologia laser para atender às profundidades praticadas na construção de poços, foram realizados testes de interação com quatro tipos de laser: o *Advanced Mid-Infrared Chemical laser* (MIRACL), o *Oxygen Iodine Laser* (COIL), o *CO₂ laser* e Pulsed Nd:YAG. Os testes demonstraram que somente o Pulsed Nd:YAG foi capaz de entregar, de forma eficiente, a potência necessária através do cabo de fibra ótica (Batarseh & Gahan, 2004).

Em 2005, o Gás Technology Institute, com o objetivo de criar um túnel através de uma rocha, aplicou um laser de fibra ótica com potência de 5,34 KW em uma amostra de arenito Berea, demonstrando com sucesso o mais recente avanço na tecnologia de laser industrial naquele momento. A demonstração proveu um valor mínimo de Energia Específica quando comparado com os testes anteriores de interação do laser com a rocha e, ainda assim, criou o túnel mais profundo até aquela data. Isto foi possível, em parte, pela efetiva remoção das partes cortadas da amostra, evitando assim a perda de energia através de acumulação térmica na matriz do corte. Adicionalmente, efeitos de fronteira foram minimizados pela utilização de uma amostra cilíndrica onde a abertura do túnel foi realizada em ambos os lados levando a um encontro no meio da amostra (Gahan *et al.*, 2005).

Nos dois anos seguintes, os lasers a fibra, comercialmente disponíveis, tiveram um aumento, em potência, de muitos watts para quilowatts. Então, através dessa evolução, foi possível entregar, com eficiência, o requisito de potência via fibra ótica no alvo em fundo de poço.

Em 2006, a Indian School of Mines, demonstrou que os avanços na tecnologia laser, através da pesquisa e experimentação em interações rocha-fluido-laser, colocaram a perfuração a laser como uma opção para a comunidade

de petróleo. Sete lasers foram identificados como sendo úteis a partir da perspectiva da indústria do petróleo (Sinha & Gour, 2006):

1. Fluoreto de Hidrogênio e Fluoreto de Deutério: - Estes operam na faixa de comprimento de onda de 2,6 a 4,2 μm . MIRACL foi usado para teste de rochas reservatório.
2. Laser Químico de Oxigênio-Iodo: opera no comprimento de onda de 1.315 μm . Possui uma grande faixa com alta precisão que pode ser usada com sucesso para resolver uma série de problemas de poços de petróleo.
3. Laser de Dióxido de Carbono: Opera em um comprimento de onda de 10,6 μm com faixa de potência de 1MW. Podendo operar nos modos contínuo e pulsado. No entanto, devido ao seu grande comprimento de onda, a atenuação ocorre por meio de fibras ópticas.
4. Laser de Monóxido de Carbono: Opera em um comprimento de onda de 5 a 6 μm . Pode operar em ambos os modos contínuo e pulsado. Sua potência média é de 200 KW.
5. Laser de Elétron Livre: No modo de onda contínua, pode ser ajustado para qualquer comprimento de onda e é considerado como laser de alta potência.
6. Laser Neodímio (YAG): Opera com comprimento de onda de 1,06 μm com potência de 4 KW.
7. Laser Fluoreto de Criptônio (excímero): Opera com comprimento de onda 0,248 μm com potência de 10 KW. Neste laser, os átomos de criptônio e fluoreto na molécula de KrF estão em estado excitado.

Em 2008, uma pesquisa conjunta foi realizada pela *Japan Drilling Co Ltd*, *Tohoku University*, *Japan Oil, Gas and Metal National Corporation* e o *Technology Research Center*. O objetivo era avaliar a aplicação do laser em uma amostra de rocha submersa em ambiente de fluido. Uma irradiação gerada por

Laser de Dióxido de Carbono com comprimento de onda de 10,6 μm foi aplicada sobre uma amostra de granito submersa a 50 mm da superfície em água / solução de bentonita. O granito foi perfurado por irradiação com o laser de CO_2 , através da água transparente e da solução de bentonita opaca. A formação de bolhas contribuiu para a remoção da rocha fundida, impedindo a sua solidificação dentro do furo, resultando em uma cavidade completa no granito (Kobayashi *et al.*, 2008).

Em 2009, a *Japan Drilling Company Limited*, *Japan Oil e Gas and Metal National Corporation*, com objetivo de dar continuidade ao estudo de perfuração de rochas, perfuraram um túnel de duas polegadas de diâmetro com Laser de Dióxido de Carbono com comprimento de onda de 10,6 μm em um bloco de granito.

Ao aplicar o laser na amostra em ambiente de atmosférico, observa-se que a rocha fundida produzida pela irradiação com laser reflete ou absorve os raios irradiados sucessivamente, evitando assim, que o calor do laser seja transmitido para dentro da rocha. Esta absorção induz tanto a um aumento da temperatura da rocha fundida quanto a um aumento na absorção da radiação laser conduzindo a interrupção do processo de destruição da rocha.

A aplicação do laser na amostra submersa demonstrou um alto coeficiente de absorção na água com irradiação intermitente. O raio laser induziu ondas de choque subaquáticas, formações de bolhas e micro jato de água formada no colapso das bolhas.

Com um laser de CO_2 pulsado de 5 KW, uma amostra de granito submersa em água pode ser perfurada pelos métodos de fusão e fragmentação. O tempo requerido para perfurar o granito por fragmentação é praticamente um terço do tempo requerido para perfurar por fusão. A geração do túnel de duas polegadas no granito quando ocorre por fusão requer quase três vezes mais energia do que por fragmentação (Kobayashi *et al.*, 2008).

Em 2010, Kerhavarzi *et al.* com o objetivo de desenvolver uma rede neural artificial para prever a profundidade de penetração do laser na criação de túnel em rocha calcário, permitindo assim avaliar a eficiência da perfuração do laser, realizou ensaios em laboratório com perfurações de túneis a laser em rocha calcário. Os parâmetros de entrada utilizados foram a potência, o tempo de aplicação, a saturação e a pressão. Estes parâmetros foram variados em cerca de

140 perfurações em amostras de calcário onde o dado de saída era a profundidade de penetração. O modelo desenvolvido de rede artificial de retropropagação para a previsão da profundidade de penetração durante a perfuração do laser em calcário, mostrou um alto coeficiente de correlação com o baixo erro e a profundidade de penetração foi predito com sucesso (Kerhavarzi, *et al.* 2010; 2010a, Kerhavarzi, Jahanbakhshi & Ghorbani, 2011).

Em 2011, Kerhavarzi *et al.*, com o objetivo de estudar a aplicação de laser de alta potência na formação dos canhoneios com iniciação de fratura em poços de gás e óleo, desenvolveu estudos experimentais de canhoneio a laser visando a implementar, no faturamento hidráulico, esta tecnologia. Foi observado que, durante a perfuração dos túneis a laser, ocorreu a formação de micro e macro fraturas, que dependem da mineralogia, das propriedades térmicas da rocha, dos espaços vazios entre os grãos e da quantidade de estresse aplicado. Eficientes mecanismos de remoção de rocha, como *spallation* de arenito e dissociação térmica de calcário levam a um aumento significativo na permeabilidade da rocha sem apresentar dano (Kerhavarzi, 2011).

Em 2011, a Universidade Islâmica Azad do Iran realizou estudos com laser de CO₂ pulsado de 700 W de potência para perfurar túneis através de rochas reservatório. Foram testadas amostras saturadas em água e não saturadas de arenito, carbonato e folhelho. Para as amostras não saturadas foi necessário um crescente nível de energia específica na sequência arenito, calcário e folhelho. A energia específica depende dos raios refletidos e distribuídos ou absorvidos. Infere-se que o nível de raios absorvidos no arenito é maior do que outro tipo de rochas.

Para as amostras saturadas foi observado o inverso, o nível de energia específica é crescente na sequência folhelho, calcário e arenito. Este fato ocorreu devido à taxa de saturação da rocha. Quando se aplica a radiação do laser na superfície do arenito, observa-se que parte da potência do laser é gasta para evaporar a água da estrutura da rocha, assim a transferência de energia para a rocha sofre uma redução (Bakhtbidar *et al.*, 2011).

Em 2012, Valente et al, com o propósito de investigar a eficiência do laser para perfurar granito e travertino, realizou testes em laboratório com laser de CO₂ (comprimento de onda de 10,6 μm e potência máxima de 140 W) e um laser diodo a fibra (comprimento de onda de 980 nm e potência máxima de 215W). Os

experimentos foram conduzidos com auxílio de um programa de computador para a aplicação alternada do tempo de exposição ao laser e do jato de alta pressão de nitrogênio, utilizado para remoção do material. Foi possível a criação de furos com diâmetros de 8 mm com uma energia específica variando entre 40 kJ/cm³ até 150 kJ/cm³. Técnicas de análise como difração de raios-X, fluorescência de raios-X e termogravimetria foram aplicadas nas amostras para avaliar concentração química das amostras, propriedades químicas e a perda de massa respectivamente (Valente, 2012).

Em 2012, a Saudi Aramco, com foco na aplicação da tecnologia laser para realizar fraturamento de poços horizontais, financiou experimentos com laser de alta potência. Testes foram conduzidos em laboratórios visando a criação de um entalhe vertical para ajudar a iniciar a fratura no ponto de interesse ao longo da seção horizontal. Diferentes tipos de rocha foram utilizados e os resultados demonstraram o potencial de aplicação desta tecnologia para múltiplo fraturamento de poço horizontal com as seguintes vantagens (Batarseh *et al.*, 2012):

1. O laser melhora as propriedades de fluxo das rochas, melhorando a porosidade, permeabilidade e ajuda a induzir fraturas, o que melhora a comunicação entre o poço e a formação.
2. Cria um túnel com controle de diâmetro, forma, profundidade e em qualquer orientação. Atravessar o campo próximo da zona de tensão é alcançável com o laser, independentemente da força de tensão horizontal máxima da rocha.
3. A energia gerada a partir do laser térmico enfraquece a formação, tal como apresentado no Módulo de Young, reduzindo assim a resistência da formação a deformar-se, permitindo assim o iniciar e propagar das fraturas.
4. As formas de remoção / destruição da rocha podem ser controladas através do ajuste da potência do laser. A vaporização é conseguida ajustando a potência para aumentar a temperatura de rocha até exceder o ponto de

fusão da amostra de rocha. A fusão da rocha ocorre quando a temperatura do laser sobre a rocha é igual ponto de fusão da rocha. A escamação (*Spallation*) ocorre apenas em algumas rochas com elevada percentagem de quartzo onde a cimentação possui diferente expansão térmica.

2.4. Monitoramento Tecnológico sobre Laser para Perfuração e Canhoneio de Rochas Reservatório

Esta subseção apresenta e discute o conjunto de documentos obtidos através de análises gráficas e dados bibliográficos. A partir do conjunto de documentos pesquisados foi possível extrair diversas informações para a caracterização da tecnologia estudada. No presente estudo foram realizadas as seguintes análises:

- (a) Evolução temporal da publicação de patentes;
- (b) Destaque dos principais atores no assunto estudado;
- (c) Caracterização da colaboração para pesquisa e desenvolvimento da tecnologia;
- (d) Apresentação dos principais mercados de interesse segundo os desenvolvedores da tecnologia;
- (e) Detalhamento da tecnologia através da análise de assunto dos documentos.

Nesta análise constam tanto patentes para perfuração quanto para canhoneio a laser.

2.4.1. Evolução temporal da publicação de patentes

O Gráfico 2 apresenta a evolução das publicações dos pedidos de patentes no conjunto recuperado. Embora a busca tenha limitação temporal a partir de 2008, a primeira patente pesquisada no estudo data de 1998 em função dos documentos das famílias das patentes. Uma tecnologia pode ser depositada em diferentes mercados, essas diferentes patentes que protegem a mesma tecnologia compõem uma família de patentes. Cabe ressaltar que os pedidos de patentes ficam em sigilo pelo período de 18 meses, somente após este, é que os

documentos são publicados, logo, o declínio no número de depósitos no ano de 2013 não pode ser sumariamente interpretado como desinteresse pela tecnologia.

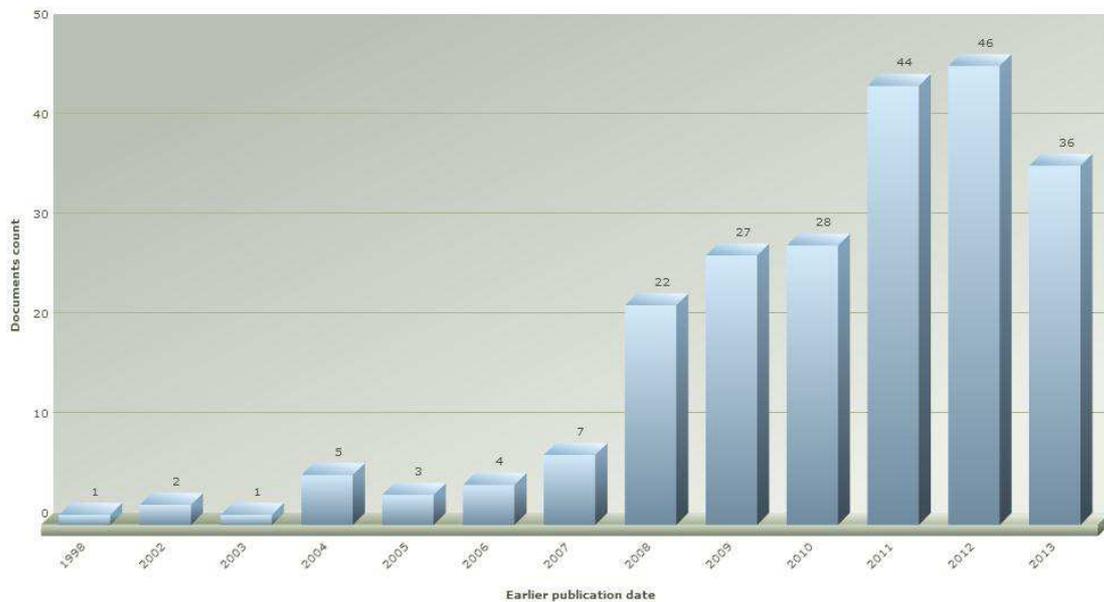


Gráfico 2 – Distribuição de patentes a partir da data de publicação
Fonte: O autor (2013).

O Gráfico 3 apresenta a distribuição geográfica de patentes baseada no país de prioridade. Os Estados Unidos detêm o primeiro depósito e o país mantém constante o interesse no desenvolvimento da tecnologia. A China, após entrada tardia, cresceu significativamente, sendo proprietária do maior número de tecnologias na área estudada.

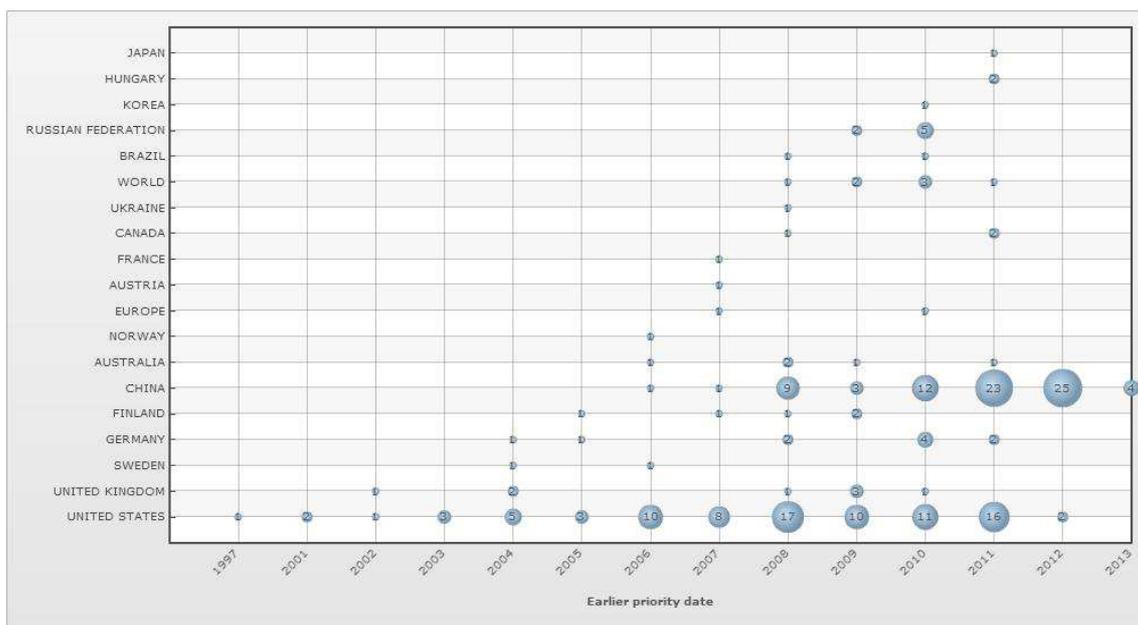


Gráfico 3 – Distribuição geográfica de patentes baseada no país de prioridade
Fonte: O autor (2013).

2.4.2. Principais atores no desenvolvimento da tecnologia

Nessa subseção são apresentadas as principais instituições que se ocuparam de pesquisas e desenvolvimentos na tecnologia estudada, através do depósito de patentes. O objetivo desse tipo de análise é identificar os concorrentes ou possíveis parceiros com interesse comum no desenvolvimento da tecnologia pesquisada.

No conjunto dos 50 depositantes com maior número de patentes e pedidos de patentes representado na Figura 3, destacam-se a Baker Hughes, com 21 documentos, seguida das empresas ExxonMobil e China Petroleum (12 documentos cada) e Schlumberger e Halliburton (8 documentos cada). A PUC-Rio aparece nessa lista com 2 documentos como pode ser visto no Gráfico 4.

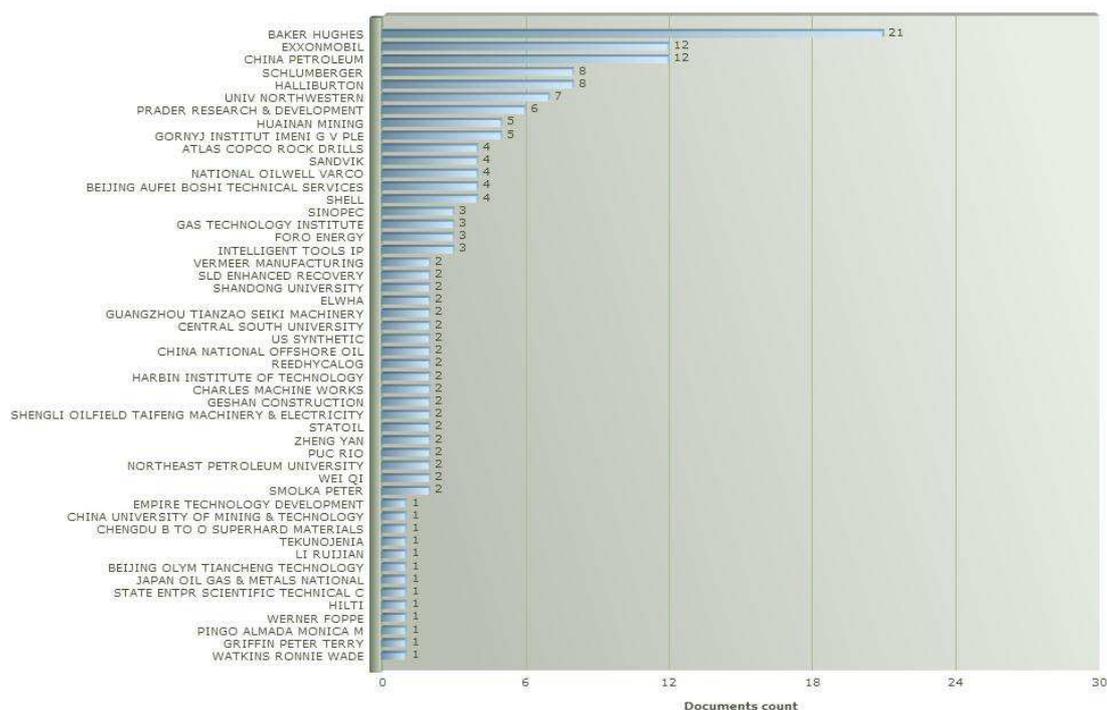


Gráfico 4 – Principais atores
Fonte: O autor (2013).

2.4.3. Caracterização da colaboração para pesquisa e desenvolvimento da tecnologia

A Figura 8 apresenta a rede de colaboração para desenvolvimento da tecnologia entre as empresas depositantes de patentes. Percebe-se que as empresas

optam pelo desenvolvimento individual, uma vez que apenas pouco mais de 6% dos documentos foi depositado em parceria. Na referida Figura 8, o número junto ao vértice representa quantidade total de documentos de patentes depositado considerando o conjunto estudado e o número junto a aresta representa o número de documentos depositados em parceria com o outro vértice ao qual o primeiro está ligado. Por exemplo, a Baker Hughes possui 21 patentes sobre laser para canhoneio de rochas reservatório e um destes documentos foi depositado em parceria com a empresa Sensor Highway, o único que a empresa possui nesse conjunto.

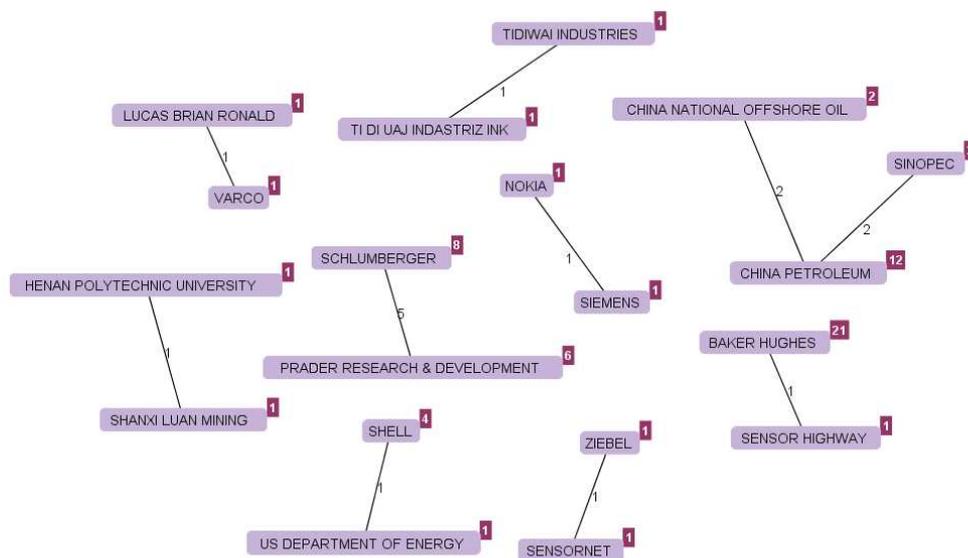
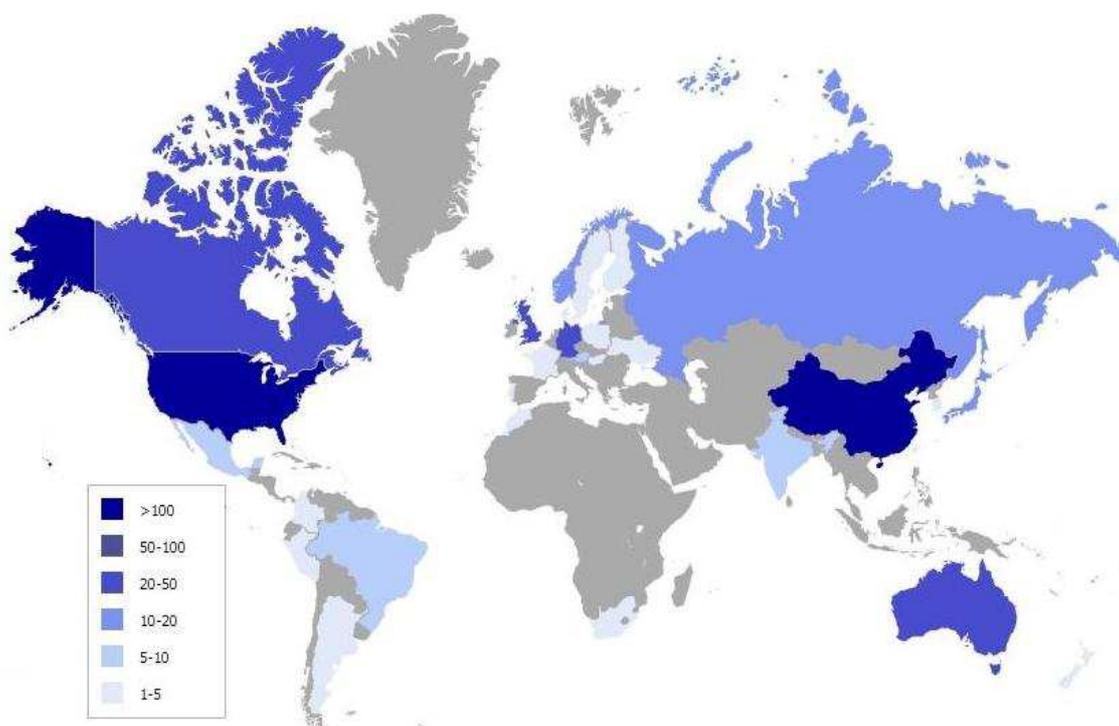


Figura 8 – Mapa de relacionamento entre os depositantes de patentes
Fonte: O autor (2013).

2.4.4. Principais mercados de interesse na comercialização da tecnologia

A análise dos mercados de interesse em comercialização da tecnologia pode ser feita a partir do estudo dos países onde os diferentes documentos de patentes foram depositados. Esse tipo de análise explicita os possíveis mercados de interesse para comercialização da tecnologia segundo seus desenvolvedores e é apresentado na Figura 9.



País	# doc	País	# doc	País	# doc
UNITED STATES	107	BRAZIL	9	SINGAPORE	2
CHINA	103	AUSTRIA	8	SOUTH AFRICA	2
WORLD	96	MEXICO	8	SWEDEN	2
EUROPE	53	INDIA	8	PERU	1
CANADA	48	KOREA	5	POLAND	1
AUSTRALIA	30	FINLAND	5	PORTUGAL	1
UNITED KINGDOM	24	ARGENTINA	4	UKRAINE	1
GERMANY	22	ISRAEL	4	FRANCE	1
NORWAY	15	TAIWAN	3	MOROCCO	1
RUSSIAN FEDERATION	15	DENMARK	3	NEW ZEALAND	1
JAPAN	14	HUNGARY	2	COLOMBIA	1

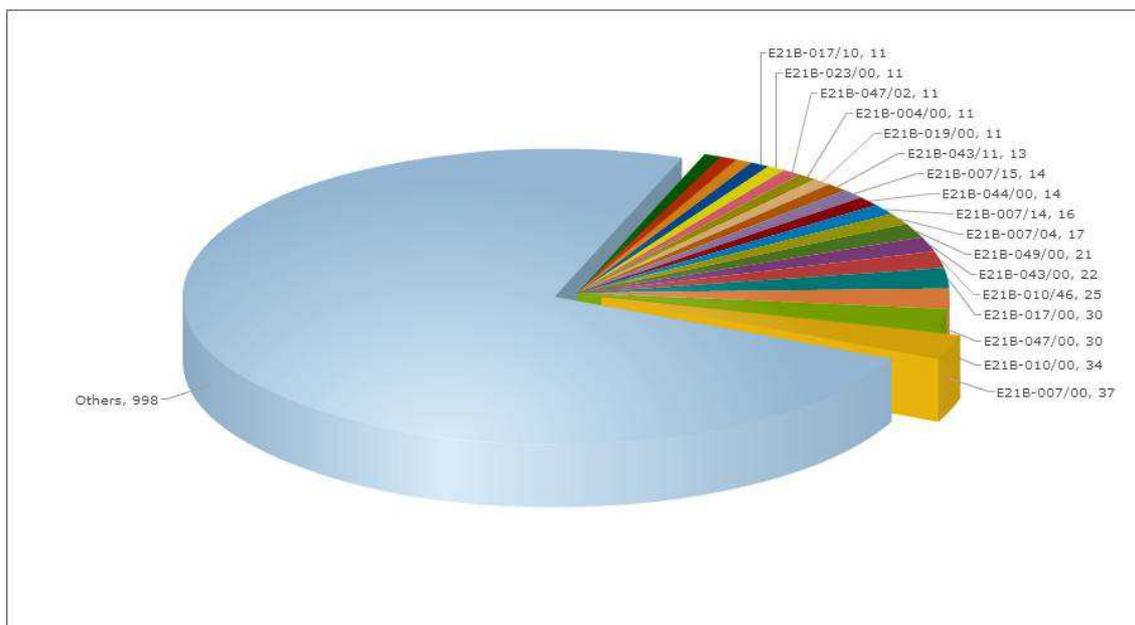
Figura 9 – Distribuição geográfica de patentes baseada no país de publicação
Fonte: O autor (2013).

2.4.5.

Detalhamento da tecnologia através da análise de assunto dos documentos

A Classificação Internacional de Patentes indica as principais áreas de interesse no patenteamento da tecnologia dentro do assunto pesquisado, orientando dessa forma a rota tecnológica que as empresas estão seguindo com o desenvolvimento tecnológico.

No Gráfico 5 pode-se observar o número de patentes para cada classificação internacional e desta forma, identificar o assunto principal de que tratam as patentes selecionadas.



IPC code	Description	#Doc
E21B-007/00	Special methods or apparatus for drilling;	37
E21B-010/00	Drill bits;	34
E21B-017/00	Drilling rods or pipes;	30
E21B-047/00	Survey of boreholes or wells;	30
E21B-010/46	Drill bits, characterised by wear resisting parts, e.g. diamond inserts;	25
E21B-043/00	Methods or apparatus for obtaining oil, gas, water, soluble or meltable materials or a slurry of minerals from wells;	22
E21B-049/00	Testing the nature of borehole walls;	21
E21B-007/04	Special methods or apparatus for drilling, Directional drilling;	17
E21B-007/14	Special methods or apparatus for drilling, Drilling by use of heat, e.g. flame drilling;	16
E21B-007/15	Special methods or apparatus for drilling, Drilling by use of heat, e.g. flame drilling, of electrically generated heat;	14
E21B-044/00	Automatic control systems specially adapted for drilling operations, i.e. self-operating systems which function to carry out or modify a drilling operation without intervention of a human operator, e.g. computer-controlled drilling systems;	14
E21B-043/11	Methods or apparatus for obtaining oil, gas, water, soluble or meltable materials or a slurry of minerals from wells, Perforators;	13
E21B-004/00	Drives used in the borehole;	11
E21B-017/10	Drilling rods or pipes, Wear protectors;	11
E21B-019/00	Handling rods, casings, tubes or the like outside the borehole, e.g. in the derrick;	11
E21B-023/00	Apparatus for displacing, setting, locking, releasing or removing tools, packers or the like in boreholes or wells;	11
E21B-047/02	Survey of boreholes or wells, Determining slope or direction;	11
E21B-007/02	Special methods or apparatus for drilling, Drilling rigs characterised by means for land transport, e.g. skid mounting or wheel mounting;	10
E21B-047/06	Survey of boreholes or wells, Measuring temperature or pressure;	10
E21B-049/08	Testing the nature of borehole walls, Obtaining fluid samples or testing fluids, in boreholes or wells;	10

Gráfico 5 – Detalhamento da Classificação Internacional de Patentes

Fonte: O autor (2013).

2.4.6.

Considerações finais da análise

Foram publicados 226 documentos de patentes desde o ano de 2008, com uma média de 38,5 depósitos/ano nesse período.

As empresas participantes da cadeia de energia compõem o grupo de maiores depositantes de patentes, que conta também com a presença de

universidade, com destaque para as instituições de ensino e pesquisa da China. Os Estados Unidos e a China são os principais mercados de comercialização da tecnologia.

Através da análise da classificação internacional de patentes percebe-se que um número significativo destes (16,3%), trata de métodos ou aparelhos especiais para perfuração. Outros grupos destacados na pesquisa tratam de brocas de perfuração e ainda, hastes ou tubos de perfuração.

As patentes que possuem maior interseção com o escopo do presente trabalho são pertencentes às áreas de perfuração e canhoneio da formação (CN203081295, CN203081285, WO2013051611, DE102011115453, WO2013023020, CN102808580, US2012255774, WO2012116153, RU2449106, CN102322216, WO2012003560, RU2010105167, CN102155196, CN102155195, CN102155199, CN102155198, CN102155197, CN102155194, RU2422624, WO2010036318, US2010044106, GB0906948, GB0906947, NO20055369, US2008053702).