

WHITE PAPER

O NOVO PADRÃO EM INTELIGÊNCIA PARA DADOS DE ENERGIA GEOTÉRMICA

Como o fluxo de trabalho integrado da Seequent simplifica a exploração, reduz os riscos de perfuração e otimiza o desempenho em campo.



Sumário executivo	03
CAPÍTULO 1 Dos riscos de exploração a recursos viáveis	04
CAPÍTULO 2 Transformação de dados multidisciplinares em um modelo em 3D em evolução	08
CAPÍTULO 3 Simulação de dados de saída de fluxo, pressão e potência com confiança	11
CAPÍTULO 4 Compreensão da subsuperfície usando uma solução completa para dados de energia geotérmica	14
CAPÍTULO 5 O futuro das geociências com inovação, ensino e colaboração	16



Sumário executivo

Todo projeto de energia geotérmica começa com uma única pergunta crítica: até que ponto compreendemos a subsuperfície?

Uma compreensão inadequada de reservatórios gera estratégias de desenvolvimento abaixo do ideal, posicionamento inadequado de alvos de poços e baixa confiança nas previsões da produção futura de energia. Isso aumenta os custos operacionais e de capital e, ao mesmo tempo, pode afetar a receita futura, pois compromete os resultados financeiros de um projeto muito antes do primeiro megawatt ser transmitido à rede.

Apesar desse risco, muitas equipes de projetos de reservatórios ainda trabalham em silos. Os dados de levantamentos geofísicos são usados em um aplicativo, os dados de geologia em 3D em outro e os dados de simulação de fluxo em um terceiro aplicativo. Todos esses dados são mantidos juntos em planilhas e scripts para esse fim. Os históricos de versões não são claros. Além disso, os processos físicos importantes e ciclos de feedback geralmente são perdidos, e o modelo final é difícil de adotar quando as aprovações do conselho ou as avaliações dos financiadores exigem transparência.

Este whitepaper foi elaborado para engenheiros de reservatórios geotérmicos, geocientistas e desenvolvedores de projetos que precisam reduzir as incertezas, agilizar o desenvolvimento e justificar as decisões sobre investimentos. Ele descreve um fluxo de trabalho integrado da Seequent (entre o Oasis montaj, o Leapfrog Energy e o Volsung) que integra modelagem geofísica e geológica, interpretação e simulação de reservatórios para decisões auditáveis e mais rápidas.

As páginas a seguir detalham como esse fluxo de trabalho integrado simplifica a exploração, reduz os riscos de perfuração e aumenta o valor dos ativos ilustrando os resultados reais da Fervo (EGS de novas áreas), da Contact Energy (desenvolvimento monitorado) e da Ormat (otimização em campo).



CAPÍTULO 1

Dos riscos de exploração a recursos viáveis

Antes do desenvolvimento do projeto da usina, das negociações de compra de energia ou da concessão de licença ambiental, a eficácia da energia geotérmica é decidida pelos primeiros poços. Normalmente, apenas um único poço injetor ou produtor profundo custa entre 4 milhões e 12 milhões¹ e, se houver interseção com uma zona restrita ou de baixa temperatura, esse capital é desperdiçado e o progresso do projeto diminui antes que o concreto seja despejado.

Estudos de portfólios mostram que, para sistemas geotérmicos aprimorados (EGS = Enhanced Geothermal System) por rochas duras ou áreas sedimentares profundas, o CAPEX de exploração pode consumir 15% do gasto total do projeto, já as taxas de bons resultados dos poços permanecem próximas de 50%.²

Erre na fase inicial e o projeto é interrompido; acerte na fase inicial e as fases posteriores (financiamento, construção e comissionamento) são agilizadas.

1. Stanford, [2025 Geothermal Drilling Cost Curves Update](#) (Atualização das curvas de custo de sondagem de energia geotérmica de 2025), 2025.

2. Climate Policy Initiative, [The Role of Public Finance in Deploying Geothermal: Background Paper](#) (Iniciativa de política sobre clima, O papel das finanças públicas na implantação da energia geotérmica – documento de referência), 2014.

Desafios relacionados a fluxos de trabalho antigos

Os fluxos de trabalho para exploração ainda se parecem muito com os adotados há uma década:

- **Geofísica:** as inversões executadas em pacotes especializados são exportadas como malhas em formato raster.
- **Geologia:** seções transversais e modelos implícitos são recriados do zero em uma outra ferramenta.
- **Pré-filtragem de dados de reservatórios:** as estimativas volumétricas e simples de aquecimento no local são calculadas em planilhas.

Geralmente, cada transferência entre ferramentas exige a reformatação ou interpolação de dados, como ajustar as resoluções das malhas, converter unidades e documentar as suposições manualmente.

Os históricos de versões se fragmentam, as suposições são ocultadas em macros, e os testes de uma teoria conceitual podem

demorar meses. O resultado é um ciclo de interpretação, congelamento e perfuração em vez de um ciclo baseado em dados que refina estruturas, reclassifica os blocos e alinha geologia e economia em tempo real.

A agilidade é importante. A Agência internacional para energias renováveis (IRENA, International Renewable Energy Agency) projeta que a geração de energia geotérmica poderia representar 15% da energia até 2050³, mas somente se as incertezas da subsuperfície forem substancialmente reduzidas e os cronogramas de desenvolvimento forem reduzidos.

Cada mês gasto em conciliação de inversões inconsistentes ou em reformatação de modelos para alternar entre ferramentas aumenta os custos de financiamento e inclui o risco de expiração da licença. Em energia geotérmica, a verdadeira restrição ao crescimento não é o aquecimento no solo, é a clareza e a agilidade com que podemos demonstrar o seu potencial.



3. IEA, *The Future of Geothermal Energy (O futuro da energia geotérmica)*, 2024.

Uma pilha de tecnologia integrada para exploração

O fluxo de trabalho integrado da Seequent ajuda a fechar a lacuna entre clareza e agilidade:

- O Oasis montaj apoia a exploração de energia geotérmica processando e exibindo dados gravimétricos, magnéticos e eletromagnéticos. Modelos de resistividade com método magnetotelúrico podem ser importados e visualizados com esses conjuntos de dados para ajudar geocientistas a interpretar estruturas na subsuperfície, refinar hipóteses geológicas e divulgar a modelagem conceitual.
- O Leapfrog Energy incorpora esses dados, com registros de lama, dados de alterações e levantamentos de pressão/temperatura/spinner (PTS, pressure/temperature/spinner), para criar um modelo geológico em 3D implícito e em tempo real.
- O Volsung importa o modelo do Leapfrog, executa uma simulação de reservatórios de volume finito, que combina modelos de furos de poços e instalações em superfícies, e gera correlações históricas e prognósticos de produção, tudo no mesmo ecossistema.

Como cada etapa compartilha uma estrutura comum de dados, as equipes passam da inversão para a previsão em dias, em vez de meses, e mantêm apenas uma trilha de auditoria durante todo o ciclo de vida de cada projeto.

Como a Fervo Energy agilizou um projeto piloto de EGS que agora fornece energia para centrais de dados da Google

Para demonstrar que o EGS de poços horizontais poderia fornecer energia contínua sem carbono, primeiro, a Fervo Energy precisou criar imagens dos corredores de fraturas no embasamento granítico de Nevada, que é um ambiente em que as informações de perfuração são limitadas. Os geofísicos usaram o Oasis montaj para interpretar dados gravimétricos, magnéticos e eletromagnéticos moldando uma compreensão conceitual da bacia. Esses dados foram encaminhados aos geólogos, que criaram um modelo implícito em 3D no Leapfrog Energy e o refinaram com observações geológicas sobre a superfície e dados de sondagens. A interpretação integrada apoiou ajustes iterativos nas trajetórias dos poços e serviu de base para decisões mais amplas sobre desenvolvimento.

Essa mudança oferece benefícios importantes, como:



Perfuração com posicionamento de alvos e menos surpresas:

volumes de resistividade com alta resolução identificaram as zonas mais permeáveis para poços horizontais emparelhados de 8.000 pés.



Iteração rápida: as inversões atualizadas foram incorporadas nos modelos do Leapfrog em horas para apoiar os ajustes de geometria antes da perfuração.



Confiança dos compradores de energia: previsões auditáveis apoiaram o acordo de energia livre de carbono da Fervo com a Google, disponível 24 horas por dia, 7 dias por semana.

[Leia a história completa →](#)



O Leapfrog Energy e o Oasis montaj podem se integrar por meio do Central. Essa capacidade facilitou a eficiente integração de vários indivíduos em cinco escritórios dos Estados Unidos e em vários fusos horários para garantir comunicação e colaboração essenciais.”

Steve Fercho

Líder de exploração e geociências da Fervo Energy

Transformação de dados multidisciplinares em um modelo em 3D em evolução

O valor das seções transversais tradicionais não pode ser subestimado. No entanto, em projetos que exigem avanço rápido e obtêm novos dados a cada trimestre, é um desafio acompanhar esse ritmo.

Como parte de um fluxo de trabalho integrado, o algoritmo de função de base radial (RBF, radial basis function) do Leapfrog Energy gera superfícies geológicas diretamente de pontos ao longo de furos de sondagem e restrições geofísicas estruturais de acordo com as configurações geológicas complexas. Seja o reservatório uma caldeira danificada, um sistema de sedimentos ou um embasamento granítico com fraturas, os geólogos passam dos dados brutos para um modelo estruturalmente coerente em horas, em vez de semanas, a fim de garantir mais tempo para interpretação dos especialistas em vez de elaboração.

Tecnologia pioneira de função de base radial

O Leapfrog foi criado com base em uma tecnologia originalmente desenvolvida para geração de imagens médicas e próteses. Essa tecnologia, conhecida como função de base radial (RBF, Radial Basis Function), passou a ser aplicada em vários setores, inclusive em Hollywood, para efeitos especiais em filmes, como O Senhor dos Anéis, e até mesmo na NASA para mapear asteroides.

Uma variedade de dados em 2D e 3D de fontes de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos e de mapeamento de superfície são analisados para identificar relações (como litologia versus temperatura e mudança versus resistividade), que servem de base para criar modelos integrados. Após a definição do modelo geológico, o modelo numérico do Leapfrog atribui variáveis estáticas, como temperatura, porosidade e outras. Essa abordagem de modelagem mantém geometrias e propriedades em um único objeto unificado em todo o fluxo de trabalho.

Qualquer mudança em um parâmetro numérico, de falha ou de contato ativa a regeneração automática de superfícies, volumes e malhas calculadas.

Volumetria em tempo real, gráficos de swath e redes estereográficas são atualizados em segundos para mostrar

como uma nova falha ou interseção de poços altera a interpretação de uma subsuperfície. O Leapfrog exporta gráficos de poços planejados e comunicação conceitual do recurso de acordo com o padrão de rastreabilidade definido pelos financiadores e engenheiros independentes.

Quando estiver pronto para simulações e prognósticos dinâmicos, o Leapfrog pode converter superfícies implícitas em uma malha discretizada e preencher parâmetros de rochas vinculados ao do modelo conceitual. Como os dados permanecem no mesmo sistema de coordenadas, nenhuma nova malha global é necessária antes de exportar para o Volsung, o TOUGH2, o Eclipse ou o CMG. As atualizações geológicas subsequentes repetem a exportação em minutos integrando a geociência e a modelagem de reservatórios e mantendo a fidelidade dos dados.



FATO CURIOSO



O Leapfrog Geo foi mencionado uma vez em uma resposta no Jeopardy!, um programa de televisão

Como a Contact Energy agilizou o desenvolvimento do projeto Tauhara de 174 MW

O desenvolvimento da segunda fase do projeto Tauhara da Contact Energy é a maior usina de energia geotérmica do tipo flash único da Nova Zelândia, que foi construída em mais de uma década. Para confirmar locais de blocos de poços e garantir aprovações de licenças ambientais, a equipe da subsuperfície precisava de um modelo integrado em 3D que pudesse incorporar novos dados rapidamente e resistir a análises regulatórias.

Usando o Leapfrog Energy, os geólogos mesclaram camadas, modelos gravimétricos, inversões de dados magnetotelúricos e mais de 70 poços de exploração — totalizando 60.000 pontos de intervalos litológicos e 1.200 perfis de pressão e temperatura — em uma única estrutura implícita. As atualizações se propagaram em minutos para que os engenheiros testassem planos alternativos de desvio durante a perfuração.

Os principais benefícios incluíram:



Os ciclos de quatro dias dos modelos foram reduzidos para quatro horas: novos registros de temperatura, litologia e seleções de alterações redefiniram todo o modelo antes da perfuração na manhã seguinte.



Layout otimizado de blocos de poços: modelos dinâmicos ajudaram a realocar dois blocos reduzindo a perfuração estimada em aproximadamente 15%.



Confiança regulatória: o Leapfrog fornece uma trilha completa de auditoria para agilizar a concessão de recursos.

[Leia a história completa →](#)

“A modelagem dinâmica no Leapfrog nos garantiu agilidade para refinar as metas ainda durante a operação das perfuratrizes e sem comprometer a trilha de auditoria exigida pelas agências reguladoras.”

Geólogo sênior de desenvolvimento
Contact Energy (projeto Tauhara)



CAPÍTULO 3

Simulação de dados de saída de fluxo, pressão e potência com confiança

As análises volumétricas de aquecimento no local, densidade de potência e curva de declínio fornecem estimativas sobre o potencial de recursos, mas não identificam os ciclos de feedback entre o rebaixamento do nível do reservatório, a produção e a reinjeção dos poços, ou como os gases não condensáveis (NCG, Non-Condensable Gases) podem afetar a geração de energia.

Agora, os financiadores insistem em previsões de campo que estejam de acordo com essas interações, relatórios de megawatts P10/P50/P90 e demonstrações de que os limites induzidos de sismicidade e subsidência serão atendidos. A entrega dessa evidência requer um simulador que incorpore a interpretação geológica do Leapfrog Energy e itere rapidamente à medida que novos dados são disponibilizados.

O Volsung aplica uma formulação de volume finito para calcular as equações de equilíbrio entre massa e energia e, consequentemente, calcular o fluxo de massa e aquecimento através das rochas dos reservatórios incluindo meios porosos e fraturados.

Os modelos de furos de poços podem ser associados a modelos de reservatórios para prever a capacidade de entrega desses poços com base nas condições dos poços e termodinâmica dos reservatórios, que, por sua vez, servem de base para os modelos de instalações em superfícies para calcular a geração de energia. O gerenciador de cálculos usa fluxos de vapor/água em uma ou duas fases, condições supercríticas, misturas de água, sal e gases não condensáveis, transporte de traçados e respostas de microgravidade e subsidência.

As abordagens paralelas de computação para velocidade de CPU e GPU reduzem o tempo de cálculo até 25 vezes em comparação com as abordagens tradicionais

e ajudam engenheiros a desenvolver modelos mais detalhados em menos tempo.

Os fluxos de trabalho de ajustes começam com a correlação entre os dados de saída do modelo dos reservatórios e os dados de pressão e temperatura de poços em um processo conhecido como ajuste de estado natural.

O ajuste continua simulando o histórico de produção de um recurso e comparando a produção de poços modelados e medidos, a entalpia e o rebaixamento do nível da pressão do reservatório. O ajuste também pode incluir respostas de microgravidade e dados de testes de traçados. O ajuste pode ser feito manualmente ou por meio de métodos de modelagem inversa. Após o ajuste adequado, as previsões podem ser feitas simulando respostas futuras do reservatório e o desempenho dos poços sob várias estratégias de desenvolvimento.

Os métodos de Monte-Carlo podem ser aplicados para fazer essas previsões considerando incertezas.

Em seguida, os stakeholders podem comparar os resultados para avaliar a estratégia ideal para desenvolvimento dos recursos. O Volsung apresenta a entalpia de cada poço, a fração de vapor, o fluxo de salmoura e a geração de energia.





Quarenta anos de produção no campo geotérmico de Steamboat

A Ormat Technologies desenvolveu um modelo numérico de reservatório para manter níveis sustentáveis de temperatura e pressão. A modelagem numérica foi usada para entender melhor os caminhos de fluxo dos fluidos, prever o desempenho a longo prazo em diferentes cenários e otimizar as estratégias de reinjeção para uma produção sustentável.

A aplicação do modelo resultou em maior alinhamento entre as observações de campo e os modelos computacionais, melhor compreensão da relação entre as estruturas do reservatório e os caminhos de fluxo dos fluidos, e decisões mais bem fundamentadas para previsão e gestão de recursos.

“Nosso modelo numérico tem sido fundamental para orientar nossas decisões operacionais e de gestão do reservatório em Steamboat. Ele forneceu insights valiosos sobre o comportamento complexo do sistema geotérmico.”

Sulav Dhakal

Engenheiro de reservatórios geotérmicos, Ormat Technologies

Para saber mais sobre como a Ormat usou o Volsung para otimizar 40 anos de produção geotérmica e melhorar a gestão do reservatório no local de Steamboat, **leia a história completa →**

Este estudo de caso foi desenvolvido de forma independente pela **Ormat e reflete a análise interna e a experiência operacional da empresa →**



CAPÍTULO 4

Compreensão da subsuperfície usando uma solução completa para dados de energia geotérmica

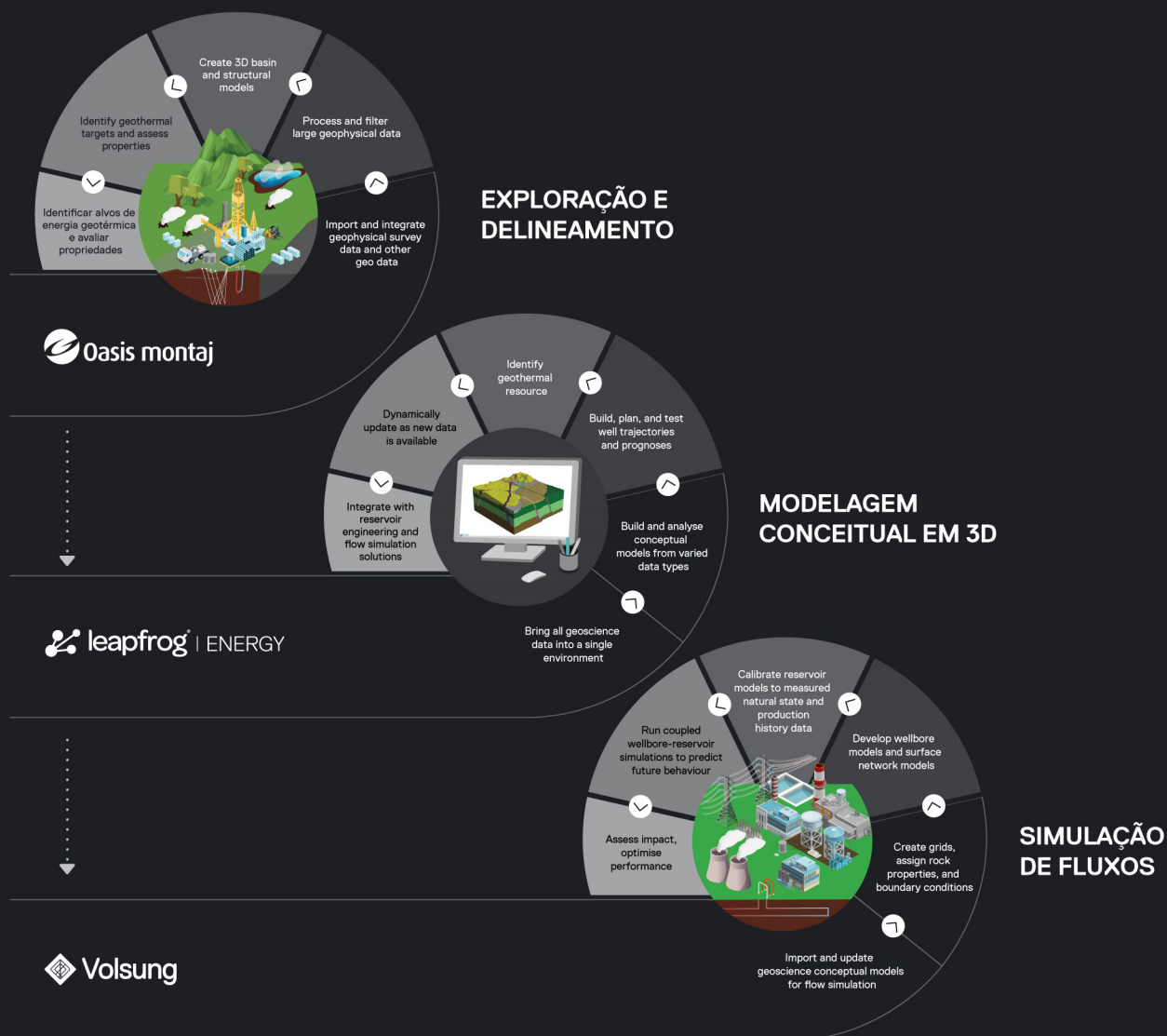
A exploração, a modelagem e a simulação avançam mais rapidamente quando cada disciplina visualiza os dados certos no mesmo espaço de trabalho, sem precisar procurar a pasta mais recente.

No fluxo de trabalho da Seequent com dados de energia geotérmica, o Oasis montaj apoia a exploração de energia geotérmica em etapa inicial processando e modelando dados magnéticos e gravimétricos e visualizando volumes de resistividade com método magnetotelúrico gerados externamente. Isso ajuda os geocientistas a interpretar estruturas subterrâneas e identificar características como falhas, zonas de alteração ou vias de fluidos — entradas essenciais para refinar modelos conceituais antes do início da modelagem geológica.

Esses conjuntos de dados são exportados e incluídos no Leapfrog Energy, onde os geólogos os integram com registros de poços, dados de alterações e levantamentos de PTS para criar um modelo conceitual dinâmico em 3D. Em seguida, esse modelo é importado para o Volsung, que simula o fluxo dos reservatórios, o desempenho dos poços e a geração de energia usando uma abordagem de volume finito.

Embora o compartilhamento de dados entre ferramentas envolva etapas manuais, o Seequent Central fornece um ambiente compartilhado e auditável para controle de versões, comparação de modelos e colaboração a fim de garantir que as equipes multidisciplinares permaneçam alinhadas durante todo o ciclo de vida do projeto.

Fluxo de trabalho com produtos integrados para projetos de energia geotérmica



Mais de 7,400
clientes usam o software
da Seequent em mais de
140 países

**O Leapfrog
Energy**
é usado em 60% dos
projetos de energia
geotérmica gerada no
mundo

Mais de 95%
de satisfação com a nossa
ajuda e suporte na linha de
frente



CAPÍTULO 5

O futuro das geociências com inovação, ensino e colaboração

Na Seequent, temos um compromisso com a energia geotérmica. Por sermos uma empresa criada por geocientistas para geocientistas, estamos constantemente expandindo os limites do que é possível com tecnologias e ferramentas inovadoras. Ao combinar conhecimento técnico com desenvolvimento de projetos para os usuários, criamos um portfólio de soluções (como o Oasis montaj, o Leapfrog Energy e o Volsung) que melhoram a maneira como compreendemos a subsuperfície e tornam processos historicamente distintos mais integrados, acessíveis e intuitivos.

Inspiração para a próxima geração de geocientistas

Reconhecemos a necessidade de inspirar e fornecer soluções para a próxima geração de geocientistas. Por isso, criamos o [Visible Geology](#), um aplicativo gratuito baseado na Web e desenvolvido para mostrar conceitos geológicos a estudantes e educadores. O Visible Geology vai além dos métodos tradicionais de ensino em 2D e capacita os alunos com uma experiência imersiva de aprendizado em 3D.

Com seus recursos intuitivos de modelagem em 3D, recursos para colaboração em sala de aula e redes estereográficas digitalizadas, o Visible Geology ajuda estudantes a compreender conceitos básicos sobre geologia de forma fascinante. Os educadores podem incluir perfeitamente essa ferramenta na grade curricular e, portanto, modernizar a experiência de aprendizagem e envolver os alunos com topografias interativas, seções transversais, amostras de testemunhos de sondagem e muito mais.

Ao incentivar alunos a explorar subsuperfícies em um ambiente digital inovador, a Seequent desempenha um papel essencial para definir o futuro do campo das geociências.

Confira o Visible Geology para
obter mais informações →

**Conheça e eficácia de um
fluxo de trabalho integrado
com tecnologia para
energia geotérmica**

Acesse seequent.com/leapfrog-energy para conferir vídeos sobre produtos e histórias de sucesso de clientes ou solicitar uma avaliação gratuita de 14 dias ou uma demonstração em tempo real.

Compreensão da subsuperfície para construir um mundo melhor.

A Seequent, The Bentley Subsurface Company, ajuda empresas a compreender a subsuperfície com a confiança necessária para tomar decisões melhores mais rapidamente.

A Seequent desenvolve tecnologia líder mundial, na vanguarda das geociências, transformando a forma de trabalhar dos nossos clientes.

Todos os dias, nós os ajudamos a desenvolver recursos minerais essenciais de maneira mais sustentável, projetar e construir uma infraestrutura melhor, gerar energia renovável e reduzir o impacto no meio ambiente.

A Seequent opera em mais de 145 países e mantém com orgulho a sua sede na Nova Zelândia.