



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

Título: *Captura de Carbono como quinta via da Transição Energética*

PREÂMBULO

A captura de carbono refere-se ao conjunto de tecnologias e soluções voltadas a reduzir a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) lançada na atmosfera, seja capturando o CO₂ antes que ele seja emitido, seja removendo o carbono que já está na atmosfera. Ela surge como resposta a um fato incontornável: mesmo com forte avanço das renováveis e da eletrificação, ainda existem setores, processos e emissões residuais que não conseguem ser eliminados totalmente no curto e médio prazo.

A captura de carbono é fundamental porque o mundo emite hoje uma quantidade de CO₂ maior do que conseguimos reduzir apenas com renováveis, eficiência e eletrificação no curto e médio prazo. Mesmo acelerando fortemente a transição energética, ainda existem emissões inevitáveis — especialmente em setores como cimento, aço, química pesada, refino, aviação e transporte marítimo. Nesses casos, o CO₂ não vem só da queima de combustível, mas do próprio processo químico. Ou seja: mesmo com energia limpa, o carbono continua sendo liberado.

Além disso, o aquecimento global não depende apenas do que emitimos agora, mas do estoque acumulado de CO₂ na atmosfera. O carbono é persistente: uma molécula de CO₂ pode ficar décadas ou séculos no ar, aprisionando calor. Por isso, combater o aquecimento global exige duas frentes ao mesmo tempo: reduzir emissões futuras e lidar com emissões presentes e passadas. É exatamente aí que a captura de carbono entra como pilar indispensável.

Capturar carbono combate ao aquecimento global de forma direta porque interrompe o caminho do CO₂ até a atmosfera ou remove esse carbono depois que ele já foi emitido. Cada tonelada capturada e armazenada é uma tonelada que deixa de contribuir para o efeito estufa. Em soluções como BECCS (bioenergia com captura) e captura direta do ar, o efeito pode ser ainda mais forte, resultando em emissões líquidas negativas, algo considerado essencial para estabilizar o clima no longo prazo.

No contexto da transição energética, a captura de carbono atua como uma ponte entre o sistema atual e o sistema de baixo carbono do futuro. Indústrias como cimento, aço, química pesada, refino e algumas formas de geração térmica emitem CO₂ não apenas pela queima de combustíveis, mas pelo próprio processo químico envolvido. Nesses casos, capturar o carbono passa a ser uma das poucas opções tecnicamente viáveis para reduzir emissões em escala, enquanto novas rotas tecnológicas amadurecem.

É importante deixar claro: a captura de carbono não é um “salvo-conduto” para continuar poluindo. Seu papel na transição energética é complementar, não substitutivo. Ela faz sentido especialmente quando aplicada a setores de difícil descarbonização, a emissões



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

inevitáveis e como ferramenta temporária de transição. Usada sem critério, pode atrasar mudanças estruturais; usada com estratégia, acelera a redução de emissões reais.

Para países como o Brasil, a captura de carbono também pode representar oportunidades econômicas e tecnológicas, seja pela aplicação em setores industriais existentes, seja pela integração com bioenergia (como o BECCS), seja pelo potencial geológico para armazenamento seguro. Quando combinada com uma matriz energética limpa, a captura de carbono pode ampliar o papel do país na agenda climática global.

A Evolução da Captura de Carbono

A captura de carbono não é uma invenção recente nem nasceu com a agenda climática atual. Ela tem uma trajetória longa, ligada à indústria, à ciência e, só mais tarde, ao combate às mudanças climáticas.

A história dos processos de captura de carbono começa bem antes de o mundo falar em aquecimento global. No final do século XIX e início do século XX, técnicas de separação de gases já eram utilizadas na indústria química e de alimentos. O dióxido de carbono era capturado, por exemplo, na produção de bebidas carbonatadas, na fabricação de gelo seco e em processos industriais específicos. Nessa fase inicial, o CO₂ era visto apenas como um subproduto útil ou indesejado, não como um problema ambiental.

Ao longo da primeira metade do século XX, os processos de separação de CO₂ evoluíram dentro da indústria química e petroquímica. Tecnologias baseadas em solventes químicos, como aminas, passaram a ser utilizadas para remover CO₂ e outros gases ácidos de correntes industriais, especialmente no processamento de gás natural. O objetivo era puramente técnico e econômico: proteger equipamentos, melhorar a qualidade do produto e aumentar a eficiência dos processos. A ideia de capturar carbono por razões climáticas ainda não existia.

A virada conceitual começa a acontecer a partir das décadas de 1950 e 1960, quando a ciência climática passa a demonstrar de forma mais clara a relação entre o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera e o aquecimento global. Mesmo assim, naquele momento, a captura de carbono ainda era vista como uma solução distante e pouco discutida fora dos círculos acadêmicos. O foco principal continuava sendo a expansão da energia fóssil para sustentar o crescimento econômico do pós-guerra.

É somente a partir dos anos 1970 e 1980, com as crises do petróleo e o fortalecimento do debate ambiental, que a captura de carbono começa a ser considerada como uma possível ferramenta de mitigação climática. Nesse período, surgem os primeiros estudos teóricos sobre a possibilidade de capturar CO₂ de grandes fontes emissoras e armazená-lo no subsolo. Curiosamente, algumas das primeiras aplicações práticas de armazenamento geológico



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

ocorreram não por motivos climáticos, mas para recuperação avançada de petróleo, onde o CO₂ injetado ajudava a extrair mais óleo de reservatórios maduros.

Nos anos 1990, com a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e a crescente atenção internacional ao tema, a captura e armazenamento de carbono passa a ser discutida de forma mais estruturada como política climática. Projetos-piloto começam a surgir, especialmente em países com forte indústria de óleo e gás. Um marco importante desse período foi o início de operações de armazenamento geológico dedicadas, demonstrando que era tecnicamente possível armazenar CO₂ de forma segura em formações geológicas profundas.

A partir dos anos 2000, os processos de captura de carbono entram em uma nova fase, marcada pela demonstração em escala industrial. Grandes projetos de CCS começam a operar em setores como gás natural, fertilizantes e geração de energia. Ao mesmo tempo, cresce o investimento em pesquisa e desenvolvimento, buscando reduzir custos, aumentar eficiência e adaptar as tecnologias a diferentes setores industriais, como cimento e siderurgia.

Na década de 2010, com o fortalecimento do Acordo de Paris e das metas de neutralidade climática, a captura de carbono ganha um novo status. Ela deixa de ser vista apenas como tecnologia complementar e passa a ser considerada indispensável em cenários de emissões líquidas zero, especialmente para setores de difícil descarbonização. Nesse período, surgem com mais força os conceitos de captura e uso do carbono, remoção de carbono do ar e soluções baseadas na natureza, ampliando o escopo da captura de carbono para além da indústria tradicional.

Atualmente, a captura de carbono vive uma fase de expansão estratégica, impulsionada pela urgência climática, pela pressão regulatória e pela necessidade de lidar com emissões residuais. O debate deixou de ser “se” a captura de carbono será necessária e passou a ser “como, onde e em que escala” ela deve ser aplicada.

Existem diferentes abordagens de captura de carbono, que podem ser agrupadas em três grandes categorias. A primeira é a captura na fonte, onde o CO₂ é separado diretamente dos gases de exaustão de indústrias ou usinas antes de ser liberado na atmosfera. A segunda é a captura e uso do carbono (CCU), em que o CO₂ capturado é reaproveitado para produzir combustíveis sintéticos, materiais de construção, produtos químicos ou outros insumos. A terceira é a captura e armazenamento de carbono (CCS), na qual o CO₂ é comprimido e armazenado de forma segura em reservatórios geológicos profundos, evitando seu retorno à atmosfera.

Há também um campo cada vez mais relevante, que é a remoção de carbono, incluindo tecnologias como a captura direta do ar (DAC) e soluções baseadas na natureza, como reflorestamento e restauração de ecossistemas. Essas abordagens são fundamentais para lidar



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

com o chamado carbono residual e, no longo prazo, permitir emissões líquidas zero ou até negativas.

Captura de Carbono na Fonte

A **captura de carbono na fonte** é uma das estratégias mais importantes dentro do pilar da captura de carbono, pois atua diretamente no local onde o dióxido de carbono é gerado. Seu objetivo central é impedir que o CO₂ produzido por processos industriais e energéticos chegue à atmosfera, interceptando esse gás ainda dentro da planta industrial ou da unidade de geração de energia. Em vez de permitir que o carbono seja liberado pelas chaminés, a captura na fonte separa o CO₂ dos gases de exaustão, trata esse carbono e o direciona para uso produtivo ou armazenamento seguro.

Essa abordagem é particularmente relevante porque uma parcela significativa das emissões globais de CO₂ vem de fontes concentradas e contínuas, como indústrias de cimento, siderurgia, química pesada, refinarias, produção de fertilizantes e algumas usinas termelétricas. Nesses casos, o carbono não está diluído no ar ambiente, mas presente em correntes gasosas relativamente concentradas, o que torna a captura tecnicamente mais viável, eficiente e econômica quando comparada a outras formas de remoção de carbono.

Na captura de carbono na fonte, o processo industrial pode continuar operando, mas passa a incorporar sistemas adicionais que separam o CO₂ antes de sua liberação. A forma mais comum é a captura realizada após a combustão, em que o combustível é queimado normalmente e o dióxido de carbono é separado dos gases de exaustão por meio de processos físico-químicos. Esses sistemas funcionam de maneira semelhante a um filtro altamente especializado, capaz de reter seletivamente o CO₂, permitindo que os demais gases sigam seu caminho. Essa rota é especialmente importante porque pode ser adaptada a instalações já existentes, reduzindo emissões sem exigir a substituição imediata de toda a infraestrutura industrial.

Outra possibilidade é a captura antes da combustão, em que o combustível é transformado previamente em um gás intermediário. Nesse processo, o carbono é separado antes da etapa de queima, e o resultado é um gás rico em hidrogênio, que pode ser utilizado como fonte de energia ou insumo industrial com menor impacto climático. Essa rota é frequentemente associada à produção de hidrogênio de baixo carbono e costuma ser mais eficiente na separação do CO₂, embora exija maior integração ao projeto industrial e seja mais comum em novas plantas.

Existe ainda a captura associada à oxidação, em que a queima do combustível ocorre com oxigênio quase puro, em vez de ar atmosférico. Isso faz com que os gases resultantes do processo sejam compostos basicamente por dióxido de carbono e vapor d'água,

simplificando a separação do CO₂. Apesar de tecnicamente promissora, essa rota ainda enfrenta desafios de custo e complexidade, mas tem grande potencial para aplicações futuras em setores intensivos em carbono.

Uma vez capturado, o dióxido de carbono passa por etapas de purificação e compressão, tornando-se adequado para transporte e destino final. Esse carbono pode ser armazenado de forma permanente em formações geológicas profundas, evitando seu retorno à atmosfera por longos períodos, ou pode ser utilizado como insumo para a produção de combustíveis sintéticos, materiais de construção, produtos químicos e outros usos industriais. O benefício climático efetivo dependerá do destino do carbono e do tempo em que ele permanecer fora da atmosfera.

A captura de carbono na fonte é especialmente crítica em setores considerados de difícil descarbonização, como a indústria do cimento, onde parte significativa das emissões não vem da queima de combustíveis, mas do próprio processo químico de produção. Nesses casos, mesmo com eletrificação e uso de energia renovável, o CO₂ continuaria sendo emitido sem a captura. Por isso, essa tecnologia se torna uma das poucas opções disponíveis para reduzir emissões em escala no curto e médio prazo.

A captura de carbono na fonte é uma resposta direta às emissões industriais concentradas, permitindo reduzir o impacto climático de setores essenciais para a economia, mas difíceis de descarbonizar. Ela não resolve sozinha o problema do aquecimento global, mas é uma peça indispensável para uma transição energética realista, tecnicamente viável e alinhada com as metas climáticas globais.

Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)

A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) é uma das estratégias mais robustas e consolidadas dentro do pilar da captura de carbono na fonte e tem como objetivo final impedir que o dióxido de carbono capturado retorne à atmosfera. Diferentemente das abordagens que reutilizam o CO₂ como insumo, o CCS foca no armazenamento permanente do carbono, garantindo que ele seja retirado do ciclo atmosférico por longos períodos, da ordem de centenas ou milhares de anos.

No contexto da transição energética, o CCS surge como resposta direta à existência de emissões inevitáveis. Mesmo com avanços significativos em eficiência energética, eletrificação e uso de fontes renováveis, determinados setores industriais continuarão emitindo CO₂ por razões técnicas, químicas ou econômicas. A captura e o armazenamento permitem lidar com esse “resíduo climático”, reduzindo emissões líquidas sem comprometer a continuidade de atividades econômicas essenciais.

O processo de CCS começa, necessariamente, com a captura do carbono, geralmente realizada diretamente na fonte emissora, como indústrias de cimento, siderurgia, refinarias, plantas químicas ou unidades de produção de hidrogênio a partir de gás natural. Após ser



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

separado dos gases de exaustão, o CO₂ é purificado e comprimido, transformando-se em um fluido denso, semelhante a um estado supercrítico. Essa etapa é fundamental para viabilizar o transporte eficiente do carbono até o local de armazenamento.

O transporte do CO₂ pode ocorrer por diferentes meios, dependendo da escala e da localização do projeto. Em regiões com grande concentração industrial, o transporte por dutos dedicados é a solução mais eficiente e econômica. Em outros casos, especialmente em projetos offshore ou em regiões isoladas, o CO₂ pode ser transportado por navios ou caminhões especializados. Independentemente do modal, essa etapa é baseada em tecnologias já amplamente conhecidas e utilizadas na indústria de óleo e gás.

O armazenamento propriamente dito ocorre em formações geológicas profundas, selecionadas com base em critérios rigorosos de segurança e estabilidade. Entre os principais tipos de reservatórios utilizados estão aquíferos salinos profundos, reservatórios de petróleo e gás exauridos e formações rochosas específicas capazes de aprisionar o CO₂ de forma segura. Nessas condições, o carbono é injetado a grandes profundidades, onde permanece confinado por múltiplas camadas geológicas impermeáveis, reduzindo ao mínimo o risco de vazamentos.

Com o tempo, o CO₂ armazenado passa por diferentes mecanismos naturais de retenção. Inicialmente, ele fica preso fisicamente na rocha; depois, dissolve-se nos fluidos presentes no reservatório; por fim, pode reagir quimicamente com os minerais da formação, transformando-se em compostos sólidos estáveis. Esses processos tornam o armazenamento progressivamente mais seguro à medida que o tempo passa, reforçando a confiabilidade do CCS como solução de longo prazo.

Do ponto de vista climático, o CCS é uma ferramenta extremamente relevante porque permite reduções reais e mensuráveis de emissões. Cada tonelada de CO₂ capturada e armazenada representa uma tonelada que deixa de contribuir para o efeito estufa. Em cenários globais de neutralidade climática, o CCS é frequentemente apontado como indispensável para atingir metas de emissões líquidas zero, especialmente quando combinado com bioenergia, resultando em emissões negativas.

No entanto, assim como outras soluções tecnológicas, o CCS não deve ser visto como solução isolada ou substituto da transição energética estrutural. Seu uso deve ser estratégico, focado em setores onde alternativas de baixo carbono ainda não estão maduras ou são tecnicamente inviáveis. Aplicar CCS em atividades em que a eletrificação ou a substituição por renováveis já é possível pode atrasar transformações necessárias e reduzir a eficiência do esforço climático.

Captura e Uso de Carbono (CCU)

A Captura e Uso de Carbono (CCU) é uma abordagem da transição energética que busca transformar o dióxido de carbono capturado em insumo produtivo, em vez de destiná-lo



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

exclusivamente ao armazenamento geológico. Diferentemente do CCS, cujo objetivo principal é retirar permanentemente o carbono do ciclo atmosférico, o CCU se apoia na lógica da economia circular, tratando o CO₂ não apenas como resíduo, mas como matéria-prima para novos produtos, combustíveis e materiais.

O CCU começa de forma semelhante às demais rotas: o CO₂ é capturado diretamente na fonte emissora, como indústrias de cimento, siderurgia, refinarias, plantas químicas ou unidades de produção de hidrogênio e amônia. Após a captura, o carbono é purificado e preparado para ser utilizado em processos industriais específicos. A grande diferença está no destino final desse CO₂, que passa a integrar novas cadeias produtivas em vez de ser confinado em reservatórios geológicos.

Uma das aplicações mais promissoras do CCU está na produção de combustíveis sintéticos, também conhecidos como e-fuels. Nessa rota, o CO₂ capturado é combinado com hidrogênio de baixo carbono, geralmente hidrogênio verde, para produzir combustíveis líquidos ou gasosos, como metanol, querosene sintético ou combustíveis para transporte marítimo e aviação. Embora esses combustíveis liberem CO₂ quando utilizados, o carbono emitido é o mesmo que foi previamente capturado, criando um ciclo fechado que reduz emissões líquidas quando comparado aos combustíveis fósseis tradicionais.

Outra aplicação relevante do CCU ocorre na indústria química, onde o CO₂ pode ser utilizado como insumo para a produção de plásticos, solventes, polímeros e intermediários químicos. Nesses casos, o carbono pode ficar incorporado aos produtos por períodos mais longos, dependendo do uso final, o que contribui para retardar seu retorno à atmosfera. Além disso, o uso de CO₂ capturado pode reduzir a necessidade de matérias-primas fósseis, diminuindo a pegada de carbono dessas cadeias industriais.

O CCU também vem ganhando espaço na indústria de materiais de construção, especialmente na produção de concreto e cimento. O CO₂ capturado pode ser utilizado em processos de cura acelerada, mineralização ou incorporação ao material, resultando em produtos com menor pegada de carbono e, em alguns casos, com propriedades mecânicas melhoradas. Essa aplicação é particularmente interessante porque o setor da construção é altamente intensivo em emissões e opera em grandes volumes, o que oferece potencial significativo de escala.

Do ponto de vista climático, é importante compreender que o CCU nem sempre resulta em remoção permanente de carbono da atmosfera. Em muitas aplicações, o CO₂ retorna ao ar em algum momento do ciclo de vida do produto, especialmente no caso de combustíveis. Por isso, o benefício climático do CCU depende fortemente de uma análise completa do ciclo de vida, considerando a origem da energia utilizada no processo, o tempo de retenção do carbono e a substituição efetiva de insumos fósseis. Quando combinado com eletricidade renovável e



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

hidrogênio verde, o CCU pode gerar reduções significativas de emissões líquidas; quando mal planejado, pode apenas deslocar emissões no tempo.

Apesar dessas limitações, o CCU desempenha um papel estratégico na transição energética porque cria valor econômico a partir do carbono capturado, ajudando a viabilizar financeiramente projetos de captura. Ao transformar CO₂ em produto, o CCU pode reduzir custos, atrair investimentos e acelerar o desenvolvimento de infraestrutura de captura, transporte e tratamento de carbono, que também poderá ser utilizada em projetos de CCS e remoção de carbono no futuro.

A Captura e Uso de Carbono representa uma abordagem intermediária e complementar dentro do pilar da captura de carbono. Ela não substitui a necessidade de reduzir emissões na origem nem elimina a importância do armazenamento permanente em muitos casos, mas amplia o leque de soluções disponíveis, conectando mitigação climática, inovação tecnológica e desenvolvimento econômico local. Quando bem aplicada, o CCU transforma um passivo ambiental em ativo produtivo, contribuindo para uma transição energética mais flexível e economicamente viável.

Remoção de Carbono do Ar (CDR)

A Remoção de Carbono do Ar (CDR) representa uma etapa ainda mais avançada e estratégica do enfrentamento às mudanças climáticas, pois não se limita a evitar novas emissões, mas busca retirar da atmosfera o dióxido de carbono que já foi emitido e acumulado ao longo de décadas. Diferentemente da captura de carbono na fonte, que atua antes que o CO₂ seja liberado, a CDR lida diretamente com o estoque histórico de carbono atmosférico, atacando a raiz física do aquecimento global.

A importância da remoção de carbono do ar está ligada à própria dinâmica do clima. O CO₂ é um gás de longa permanência na atmosfera, capaz de reter calor por períodos que variam de décadas a séculos. Isso significa que, mesmo que o mundo reduzisse drasticamente suas emissões amanhã, o aquecimento global continuaria por conta do carbono já acumulado. Por essa razão, os principais cenários climáticos internacionais indicam que não será possível estabilizar o clima apenas reduzindo emissões; será necessário também remover parte do CO₂ existente no ar, e é exatamente esse o papel da CDR.

Uma das abordagens tecnológicas mais conhecidas da CDR é a captura direta do ar, na qual equipamentos industriais filtram o ar ambiente e separam o dióxido de carbono presente em baixas concentrações. Embora o ar tenha uma concentração muito menor de CO₂ do que os gases industriais, essas tecnologias permitem capturar carbono de forma independente da fonte emissora, o que é particularmente relevante para compensar emissões difusas ou residuais,

como as da aviação, da agricultura e de parte do transporte marítimo. Após a captura, o CO₂ segue para uso produtivo ou, preferencialmente, para armazenamento geológico permanente.

Outra rota fundamental de remoção de carbono do ar é a bioenergia com captura e armazenamento de carbono, conhecida como BECCS. Nesse caso, a biomassa absorve CO₂ da atmosfera durante seu crescimento por meio da fotossíntese. Essa biomassa é então utilizada para geração de energia, produção de biocombustíveis ou outros usos, e o carbono liberado nesse processo é capturado e armazenado. O resultado é um balanço climático negativo, pois mais carbono é removido da atmosfera do que emitido. Essa abordagem é considerada uma das mais promissoras para alcançar emissões líquidas negativas, especialmente em países com forte base agrícola e florestal.

Além das soluções tecnológicas, a CDR inclui também as chamadas soluções baseadas na natureza, como reflorestamento, restauração de ecossistemas, recuperação de solos degradados e manejo sustentável de florestas, manguezais e áreas úmidas. Esses sistemas naturais funcionam como grandes sumidouros de carbono, capturando CO₂ de forma contínua e oferecendo, ao mesmo tempo, benefícios adicionais como conservação da biodiversidade, regulação do ciclo da água e geração de renda local. Embora essas soluções enfrentem desafios relacionados à permanência e ao monitoramento do carbono estocado, elas são essenciais pela escala e pelos co-benefícios socioambientais que oferecem.

Do ponto de vista climático, a remoção de carbono do ar é vista como indispensável no longo prazo. À medida que o mundo avança na redução de emissões, sempre restarão emissões residuais difíceis ou impossíveis de eliminar completamente. A CDR permite compensar essas emissões, viabilizando metas de neutralidade climática e, em alguns cenários, a redução gradual da concentração de CO₂ atmosférico. Sem essa etapa, os objetivos mais ambiciosos de limitar o aquecimento global tornam-se extremamente difíceis de alcançar.

A Remoção de Carbono do Ar amplia o escopo da transição energética, reconhecendo que o desafio climático não é apenas evitar novas emissões, mas corrigir o excesso de carbono já presente na atmosfera. Ela não substitui os demais pilares da transição, mas completa o esforço coletivo de estabilizar o clima em um planeta já profundamente impactado pela ação humana.

Bioenergia com Captura (BECCS)

O BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage), ou bioenergia com captura e armazenamento de carbono, é um conceito que combina dois processos já conhecidos, mas que juntos ganham um significado climático muito especial. De um lado, está a bioenergia, produzida a partir de biomassa como resíduos agrícolas, florestais, cana-de-açúcar, madeira, resíduos orgânicos ou biogás. Do outro, está a captura e armazenamento de carbono (CCS), aplicada às

emissões geradas durante o uso dessa biomassa. O resultado dessa combinação é algo raro no debate climático: emissões líquidas negativas.

O princípio de funcionamento do BECCS é relativamente simples de entender, mas profundo em suas implicações. Durante seu crescimento, a biomassa retira dióxido de carbono da atmosfera por meio da fotossíntese. Esse carbono fica armazenado na matéria orgânica da planta. Quando a biomassa é utilizada para gerar energia — seja eletricidade, calor ou biocombustíveis — o carbono capturado seria naturalmente liberado novamente na forma de CO₂. No BECCS, porém, esse CO₂ é capturado na fonte e armazenado de forma permanente em reservatórios geológicos profundos. Assim, o carbono que estava no ar é retirado e não retorna à atmosfera, criando um balanço climático negativo.

Do ponto de vista do combate ao aquecimento global, essa característica torna o BECCS extremamente relevante. Enquanto a maioria das estratégias da transição energética busca reduzir emissões futuras, o BECCS permite remover carbono já presente na atmosfera, ajudando a compensar emissões residuais de setores que dificilmente conseguirão chegar a zero absoluto, como aviação, transporte marítimo, parte da indústria pesada e agricultura. Por isso, praticamente todos os cenários climáticos que limitam o aquecimento a 1,5 °C ou 2 °C incluem o BECCS em alguma escala.

O BECCS pode ser aplicado em diferentes tipos de sistemas bioenergéticos. Ele pode estar associado à geração de eletricidade a partir de biomassa sólida, à produção de etanol e outros biocombustíveis, ao uso de biogás e biometano ou a processos industriais que utilizam biomassa como insumo energético. Em muitos desses casos, a captura de carbono é tecnicamente mais fácil do que em fontes fósseis, pois os gases gerados costumam ter alta concentração de CO₂, o que reduz custos e aumenta a eficiência da captura.

No contexto brasileiro, o BECCS apresenta vantagens estratégicas únicas. O Brasil já possui uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo e uma longa experiência com bioenergia, especialmente com a cana-de-açúcar. Usinas de etanol, por exemplo, produzem correntes de CO₂ relativamente puras durante o processo de fermentação, o que torna a captura mais simples e barata. Além disso, o país dispõe de grande disponibilidade de biomassa, resíduos agrícolas e potencial geológico para armazenamento, criando condições reais para projetos de BECCS em escala relevante.

No entanto, apesar de seu enorme potencial, o BECCS também levanta desafios importantes. O principal deles está relacionado ao uso da terra. A expansão desordenada de biomassa para fins energéticos pode competir com a produção de alimentos, pressionar ecossistemas naturais e gerar impactos sociais negativos. Por isso, o BECCS só faz sentido climático e ambiental quando baseado em biomassa sustentável, resíduos, áreas degradadas e cadeias produtivas bem reguladas. Caso contrário, o risco é resolver um problema climático criando outros ambientais e sociais.



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

Outro desafio está nos custos e na governança. Projetos de BECCS exigem investimentos elevados, infraestrutura de captura e armazenamento e marcos regulatórios claros para garantir a integridade ambiental do processo. Além disso, é essencial monitorar e verificar de forma transparente a quantidade de carbono realmente removida da atmosfera, evitando dupla contagem ou créditos climáticos sem base real.

Quando bem aplicado, o BECCS é uma das poucas ferramentas capazes de reduzir o estoque de carbono atmosférico, algo essencial para estabilizar o clima no longo prazo.

Soluções Baseadas na Natureza (Nature-Based Solutions – Nbs)

As Soluções Baseadas na Natureza representam a forma mais antiga — e ao mesmo tempo mais atual — de captura e remoção de carbono, pois utilizam os processos naturais dos ecossistemas para absorver, armazenar e manter o dióxido de carbono fora da atmosfera. Diferentemente das tecnologias industriais de captura, essas soluções se apoiam na capacidade biológica de florestas, solos, oceanos e ecossistemas costeiros de funcionar como sumidouros naturais de carbono, ao mesmo tempo em que geram benefícios ambientais, sociais e econômicos amplos.

No contexto da transição energética e climática, as soluções baseadas na natureza atuam diretamente sobre o estoque de carbono atmosférico, por meio da fotossíntese e do acúmulo de carbono na biomassa vegetal e nos solos. Árvores, plantas, algas e microrganismos retiram CO₂ da atmosfera para crescer e se desenvolver, transformando carbono atmosférico em matéria orgânica sólida. Quando bem manejados, esses sistemas podem armazenar carbono por longos períodos, reduzindo a concentração de gases de efeito estufa e ajudando a desacelerar o aquecimento global.

Entre as principais aplicações das soluções baseadas na natureza estão o reflorestamento e a restauração florestal, especialmente em áreas degradadas ou desmatadas. Ao recuperar ecossistemas naturais, não apenas se aumenta a captura de carbono, como também se restabelecem funções ecológicas essenciais, como regulação do clima local, proteção do solo, manutenção do ciclo da água e conservação da biodiversidade. Diferentemente de plantações homogêneas, a restauração de ecossistemas diversos tende a ser mais resiliente e a armazenar carbono de forma mais estável ao longo do tempo.

Outro componente fundamental das soluções baseadas na natureza está na gestão e recuperação dos solos, especialmente em áreas agrícolas e de pastagem. Práticas como agricultura regenerativa, integração lavoura-pecuária-floresta, manejo adequado de resíduos orgânicos e redução do revolvimento do solo aumentam o teor de carbono armazenado no solo. Como os solos representam um dos maiores reservatórios de carbono do planeta, pequenas



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

melhorias na sua gestão podem gerar impactos climáticos significativos, além de aumentar a produtividade agrícola e a segurança alimentar.

Os ecossistemas costeiros e marinhos, como manguezais, marismas e pradarias marinhas, também desempenham papel crucial nas soluções baseadas na natureza, sendo frequentemente chamados de sistemas de “carbono azul”. Esses ambientes têm uma capacidade excepcional de capturar e armazenar carbono, muitas vezes superior à das florestas terrestres, além de protegerem as zonas costeiras contra erosão, tempestades e elevação do nível do mar. A conservação e recuperação desses ecossistemas é uma estratégia altamente eficiente tanto do ponto de vista climático quanto da adaptação às mudanças climáticas.

Do ponto de vista climático, as soluções baseadas na natureza são especialmente valiosas porque combinam mitigação e adaptação. Ao mesmo tempo em que capturam carbono, elas tornam os territórios mais preparados para eventos extremos, como secas, enchentes e ondas de calor. Além disso, geram co-benefícios sociais importantes, como geração de renda local, fortalecimento de comunidades tradicionais, conservação de recursos naturais e melhoria da qualidade de vida.

A capacidade de captura depende da disponibilidade de áreas, do tempo de maturação dos ecossistemas e da permanência do carbono armazenado. Incêndios, desmatamento e mudanças no uso da terra podem reverter rapidamente os ganhos climáticos obtidos. Por isso, essas soluções exigem planejamento, monitoramento, governança e proteção de longo prazo.

Para países como o Brasil, as soluções baseadas na natureza representam uma vantagem estratégica única. A vasta extensão territorial, a diversidade de biomas, a presença de grandes áreas degradadas passíveis de restauração e o potencial dos ecossistemas costeiros colocam o país em posição central na agenda climática global. Quando integradas a políticas públicas, instrumentos econômicos e estratégias de desenvolvimento sustentável, essas soluções podem gerar impacto climático relevante ao mesmo tempo em que promovem inclusão social e desenvolvimento regional.

As soluções baseadas na natureza ampliam o conceito de captura de carbono ao reconhecer que a própria natureza é uma aliada essencial na estabilização do clima. Elas não substituem tecnologias industriais nem dispensam a transição energética, mas complementam esses esforços ao tratar do carbono já presente na atmosfera de forma integrada, sistêmica e multifuncional.

Conclusões

A captura de carbono se consolida como um pilar indispensável da transição energética ao reconhecer uma realidade incontornável: mesmo com a rápida expansão das energias renováveis, da eficiência energética e da eletrificação, ainda existirão emissões residuais que



PROGRAMA FAROL DO FUTURO CAPTURA DE CARBONO & ADVOCACY

não podem ser eliminadas totalmente no curto e médio prazo. Capturar carbono é, portanto, uma resposta técnica e estratégica para lidar com esses limites, permitindo reduzir emissões reais enquanto a transformação estrutural do sistema energético avança.

Ao longo das diferentes abordagens — captura na fonte, armazenamento geológico, uso do carbono, remoção direta do ar e soluções baseadas na natureza — fica claro que a captura de carbono não é uma tecnologia única, mas um conjunto de soluções complementares, cada uma com papel específico. Enquanto algumas evitam que o CO₂ chegue à atmosfera, outras tratam do carbono já acumulado, ampliando o alcance da ação climática e permitindo trajetórias mais realistas rumo às emissões líquidas zero.

É fundamental, no entanto, compreender que a captura de carbono não substitui os demais pilares da transição energética. Seu uso deve ser criterioso, focado em setores de difícil descarbonização, emissões inevitáveis e correção do legado climático. Quando integrada a políticas públicas, governança adequada e critérios ambientais rigorosos, a captura de carbono deixa de ser vista como exceção e passa a ser parte legítima de uma estratégia climática responsável.

Em síntese, a captura de carbono representa o reconhecimento de que combater o aquecimento global exige não apenas reduzir o futuro, mas também corrigir o passado. Ela fecha a conta climática da transição energética, permitindo que a humanidade avance com realismo, responsabilidade e ambição.