



Revista Angolana de Ciências

Vol. 8, Nº 1. e080118. Janeiro – Junho, 2026
(Publicação em Fluxo Contínuo)

Perspetivas da Supercondutividade na Formação Científica e Engenharia

Perspectives of Superconductivity in Scientific Education and Engineering

Perspectivas de la superconductividad en la educación científica y la ingeniería

Leonardo Miúdo¹, João Murta Pina²,
José Francisco Luís³, Josué Ananias Sudi⁴,
Isata Lemba⁵

RESUMO

A supercondutividade, descoberta em 1911 por Heike K. Onnes, constitui uma das áreas mais promissoras da física moderna, com aplicações que vão desde o transporte eficiente de energia até à computação quântica. Ao longo do século XX, a sua evolução incluiu a formulação da teoria BCS (1957) e a descoberta dos supercondutores de alta temperatura (HTS, de High – Temperature Superconductors) crítica (1986), marcos que ampliaram significativamente o leque de aplicações tecnológicas. Apesar desses avanços, a sua investigação permanece pouco desenvolvida em países com infraestruturas científicas emergentes, como Angola. Considerando que o país possui reservas de nióbio em Quilengues, Huíla, pouco exploradas, este recurso pode assumir papel estratégico no desenvolvimento científico, industrial e tecnológico do país. O nióbio é um dos materiais relevantes em supercondutividade, elemento essencial na produção de supercondutores de baixa temperatura (LTS, de Low – Temperature Superconductors), como nióbio - titânio NbTi e nióbio - estanho Nb₃Sn, amplamente utilizados em aceleradores de partículas e em tecnologias médicas. Embora os HTS apresentem vantagens de refrigeração, os compostos de nióbio continuam insubstituíveis em diversas aplicações devido à sua fiabilidade, maturidade tecnológica e consolidação industrial. Este trabalho analisa os fundamentos da supercondutividade, discute as suas principais aplicações e avalia oportunidades para a sua integração no contexto científico angolano. A sua introdução sistemática em programas de formação científica em materiais, física e engenharia pode reforçar a capacitação de investigadores e abrir caminhos concretos para a inovação tecnológica sustentável. O artigo conclui com uma reflexão sobre os desafios estruturais existentes e propõe meios para fomentar a investigação colaborativa em supercondutividade, contribuindo para posicionar Angola no panorama científico global.

Palavras-chave: supercondutividade; investigação; formação científica; inovação tecnológica.

RECEBIDO: 15/11/2025

ACEITE: 15/01/2026

PUBLICADO: 30/06/2026



Como citar: Miúdo, L., Pina, J.M., Luís, J., Sudi, J.A., Lemba, I. (2026). Perspetivas da Supercondutividade na Formação Científica e Engenharia. *RAC: Revista Angolana de Ciências*, 8(1), e080118 <https://doi.org/10.54580/R0801.18>

1. Instituto Politécnico, Universidade Katyavala Bwila, 1725 Benguela, Angola, Departamento de Engenharia e Centro de Investigação Científica e Desenvolvimento, Instituto Superior Politécnico de Benguela - ISPB, Benguela, Angola, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA), UNINOVA-Centro de Tecnologia e Sistemas (CTS) e Laboratório Associado em Sistemas Inteligentes (LASI), 2829-516 Caparica, Portugal leonardo.miudo@hotmail.com / <https://orcid.org/0000-0003-4790-8721>
2. Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA), UNINOVA-Centro de Tecnologia e Sistemas (CTS) e Laboratório Associado em Sistemas Inteligentes (LASI), 2829-516 Caparica, Portugal jmmp@fct.unl.pt / <https://orcid.org/0000-0002-9283-8497>
3. Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Universidade do Namibe, Moçâmedes, Angola, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa (FCT NOVA), UNINOVA-Centro de Tecnologia e Sistemas (CTS) e Laboratório Associado em Sistemas Inteligentes (LASI), 2829-516 Caparica, Portugal jose.luis@uninbe.ao / <https://orcid.org/0000-0002-0703-6538>
4. Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Universidade do Namibe, Moçâmedes, Angola josuesudi1992@gmail.com / <https://orcid.org/0009-0002-7140-5622>
5. Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Universidade do Namibe, Moçâmedes, Angola isata.lemba@uninbe.ao / <https://orcid.org/0000-0002-0121-8875>

E-ISSN. 2664-259X

e080118



© 2026. The Author(s). Published under a
Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Superconductivity, discovered in 1911 by Heike K. Onnes, is one of the most promising areas of modern physics, with applications ranging from efficient energy transmission to quantum computing. Throughout the twentieth century, its development included the BCS theory (1957) and the discovery of high-temperature superconductors (HTS) in 1986, which greatly expanded technological applications. Despite these advances, research in superconductivity remains limited in countries with emerging scientific infrastructure, such as Angola. Considering that the country has niobium reserves in Quilengues, Huíla, which are still little explored, this resource may play a strategic role in national scientific, industrial, and technological development. Niobium is an important material in superconductivity and a key element in the production of low-temperature superconductors (LTS), such as niobium–titanium (NbTi) and niobium–tin (Nb₃Sn), widely used in particle accelerators and medical technologies. Although HTS materials offer advantages in cooling requirements, niobium-based compounds remain essential in many applications due to their reliability, technological maturity, and industrial consolidation. This paper reviews the basic principles of superconductivity, discusses its main applications, and evaluates opportunities for its integration into the Angolan scientific context. The systematic introduction of superconductivity into scientific training programs in materials science, physics, and engineering can strengthen researcher capacity and open concrete paths toward sustainable technological innovation. The article concludes with a reflection on existing structural challenges and proposes ways to promote collaborative research in superconductivity, contributing to Angola’s positioning in the global scientific landscape.

Keywords: superconductivity; research; scientific education; technological innovation.

Resumen

La superconductividad, descubierta en 1911 por Heike K. Onnes, es una de las áreas más prometedoras de la física moderna, con aplicaciones que van desde el transporte eficiente de energía hasta la computación cuántica. A lo largo del siglo XX, su evolución incluyó la formulación de la teoría BCS (1957) y el descubrimiento de Superconductores de Alta Temperatura (HTS) críticos (1986), hitos que ampliaron significativamente el abanico de aplicaciones tecnológicas. A pesar de estos avances, su investigación sigue subdesarrollada en países con infraestructuras científicas emergentes, como Angola. Teniendo en cuenta que el país cuenta con reservas de niobio en Quilengues, Huíla, poco exploradas, este recurso puede asumir un papel estratégico en el desarrollo científico, industrial y tecnológico del país. El niobio es uno de los materiales relevantes en la superconductividad, un elemento esencial en la producción de superconductores de baja temperatura (LTS), como el niobio-titanio NbTi y el niobio-estaño Nb₃Sn, ampliamente utilizados en aceleradores de partículas y tecnologías médicas. Aunque HTS tiene ventajas en refrigeración, los compuestos de niobio siguen siendo insustituibles en muchas aplicaciones debido a su fiabilidad, madurez tecnológica y consolidación industrial. Este artículo analiza los fundamentos de la superconductividad, analiza sus principales aplicaciones y evalúa las oportunidades para su integración en el contexto científico angolés. Su introducción sistemática en programas de formación científica en materiales, física e ingeniería puede fortalecer la capacidad de los investigadores y abrir caminos concretos para la innovación tecnológica sostenible. El artículo concluye con una reflexión sobre los desafíos estructurales existentes y propone formas de fomentar la investigación colaborativa en superconductividad, contribuyendo a posicionar a Angola en el panorama científico global.

Palabras clave: superconductividad; investigación; formación científica; Innovación tecnológica.

Introdução

A supercondutividade é um estado da matéria. O termo é utilizado para designar os materiais em que esse estado é possível, ou seja, é um conjunto de propriedades físicas observadas em alguns materiais onde a resistência elétrica é zero e o campo magnético é expelido do material. As propriedades básicas dos supercondutores são: resistência elétrica nula em corrente contínua, elevado diamagnetismo, quando o material é arrefecido abaixo de uma temperatura crítica, T_c , criogénica (Supreeth et al., 2022). O fenómeno da supercondutividade foi descoberto por Heike Kamerlingh Onnes, em 1911. As primeiras pesquisas revelaram supercondutores de baixa temperatura (LTS), em T_c igual a 4 K (Lilia et al., 2022), **Figura 1**. O fenómeno tem sido objeto de investigação intensiva, impulsionando avanços teóricos e experimentais significativos. A formulação da teoria BCS proposta por John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer em 1957, forneceu o primeiro enquadramento microscópico coerente para a compreensão da supercondutividade convencional, enquanto a identificação de materiais supercondutores de alta temperatura (HTS) acima de 77 K (temperatura de ebulição do azoto líquido) na sequência das descobertas de George Bednorz e Alexander Muller, na década de 1980, ampliou substancialmente o horizonte das suas aplicações tecnológicas (Mercer & Pashkin, 2023) e (Rossi, 2023).

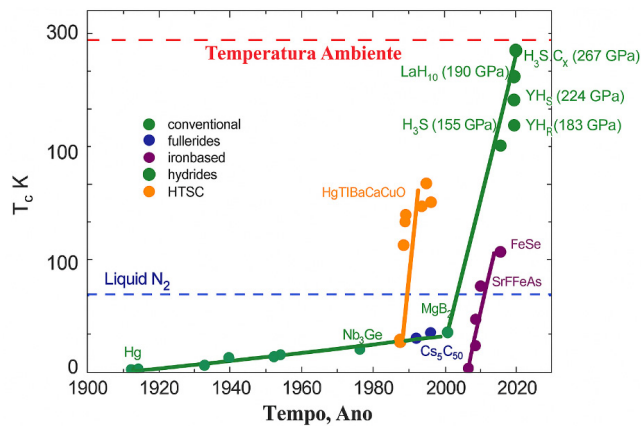


Figura 1: A evolução da temperatura na transição da supercondutividade dos materiais.

Fonte: Adaptado de (Lilia et al., 2022).

Atualmente, a supercondutividade desempenha um papel central em diversas áreas estratégicas da ciência e da engenharia. As suas aplicações incluem sistemas de imagiologia médica por ressonância magnética (MRI, de Magnetic Resonance Imaging), aceleradores de partículas, dispositivos de confinamento magnético para fusão nuclear e, mais recentemente, plataformas de computação quântica (Bray, 2009). Não obstante, a complexidade tecnológica associada à produção e manutenção de materiais supercondutores limita a sua disseminação em contextos de infraestruturas emergentes, acentuando a distância entre os centros de investigação avançada e os países em vias de desenvolvimento.

Neste contexto, Angola apresenta uma oportunidade singular. As reservas de nióbio localizadas nas minas da Bonga em Quilengues, na província da Huíla, possuem potencial estratégico para além do valor económico direto. O nióbio é um elemento crítico na produção de ligas supercondutoras, particularmente em composições do tipo nióbio - titânio NbTi e nióbio - estanho Nb₃Sn, amplamente utilizadas em magnetos de alto desempenho (Banno, 2023). A valorização científica e tecnológica deste recurso pode, portanto, constituir um ponto de inflexão para a criação de capacidades endógenas em ciência dos materiais e engenharia aplicada.

O presente artigo tem como objetivo propor uma perspetiva estratégica para a integração da investigação em supercondutividade nos programas de formação científica e tecnológica em Angola. Pretende-se delinear um percurso que permita ao país articular a exploração sustentável dos seus recursos naturais com o desenvolvimento de competências de alto nível, contribuindo para a inserção de Angola na cadeia global de valor da tecnologia e da inovação científica.

Enquadramento Teórico e Estado da Arte

Fundamentos da Supercondutividade

A supercondutividade é um fenómeno quântico macroscópico que se manifesta em certos materiais quando estes são arrefecidos abaixo de uma T_c . Nessa condição, o material exibe duas propriedades fundamentais: resistência elétrica nula e expulsão do campo magnético, conhecida como efeito Meissner. Estas características distinguem o estado supercondutor de qualquer outro estado da matéria, sendo essenciais para as suas aplicações tecnológicas.

Zero Resistência Elétrica

A ausência de resistência elétrica significa que uma corrente, uma vez estabelecida num circuito supercondutor fechado, pode circular indefinidamente sem dissipação de energia. Experimentalmente, observou-se que a resistência de certos metais, como o mercúrio e o chumbo, cai abruptamente para valores inferiores ao limite de deteção dos instrumentos quando a temperatura é reduzida abaixo de T_c . Este comportamento não é uma simples extrapolação da tendência resistiva observada a baixas temperaturas — trata-se de uma transição de fase, onde o material passa de um estado normal (com resistência finita) para um estado ordenado quântico.

Do ponto de vista prático, esta propriedade permite a criação de circuitos de alta eficiência energética, linhas de transmissão sem perdas (Tiago Batista de Sousa et al., 2025; Willen et al., 2025) e dispositivos magnéticos de grande potência (Tixador, 2010). Contudo, a maioria dos materiais supercondutores requer temperaturas extremamente baixas, o que impõe desafios de engenharia relacionados com criogenia e controlo térmico.

O Efeito Meissner

Descoberto em 1933 por Walther Meissner e Robert Ochsenfeld, o efeito Meissner caracteriza a expulsão total do campo magnético do interior de um material supercondutor quando este entra no estado supercondutor (Kozhevnikov, 2021). Este fenómeno distingue a supercondutividade de uma simples condução perfeita mesmo que um condutor ideal sem resistência pudesse ser imaginado, ele não apresentaria a capacidade de expulsar campos magnéticos.

Fisicamente, o efeito Meissner resulta da formação de correntes de blindagem (ou shielding currents) na superfície do material, que geram um campo magnético oposto ao campo externo aplicado (Kozhevnikov, 2021). Estas correntes limitam a penetração do campo a uma espessura característica designada por profundidade de penetração de London, tipicamente da ordem de dezenas a centenas de nanómetros (Li, 2003). Este comportamento revela a natureza coletiva e coerente do estado supercondutor, **Figura 2**.

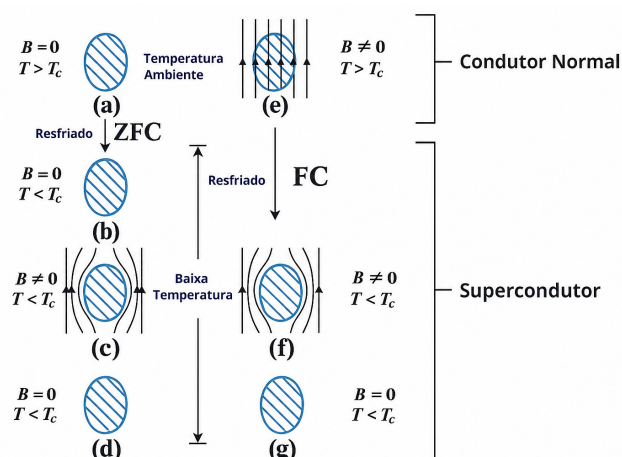


Figura 2: Propriedades diamagnéticas perfeitas dos supercondutores sob diferentes processos de resfriamento, **ZFC** (*Zero-Field Cooling*) - Arrefecimento sem campo; **FC** (*Field Cooling*) - Arrefecimento com campo (a) e (b). A amostra torna-se supercondutora na ausência de campo magnético. (c) Campo magnético aplicado a um supercondutor. (d) Campo magnético aplicado é removido. (e) e (f) A amostra torna-se supercondutora na presença de um campo magnético aplicado. (g) Campo magnético aplicado é removido.

Fonte: Adaptado de (Qin et al., 2024).

A compreensão teórica da supercondutividade foi alcançada apenas em 1957, com a formulação da teoria BCS. Segundo este modelo, os elétrons num material supercondutor não se comportam como partículas independentes, mas formam pares correlacionados, conhecidos como pares de Cooper, devido à interação atrativa mediada por vibrações da rede cristalina (Hirsch, 2009).

Estes pares de elétrons possuem momento total nulo e comportam-se coletivamente como um único estado quântico macroscópico. A energia necessária para quebrar um par de Cooper define o gap supercondutor, uma barreira energética que impede a dispersão dos elétrons e, conseqüentemente, a dissipação de energia elétrica (Hirsch, 2009).

A teoria BCS descreve com sucesso a maioria dos supercondutores metálicos fornecendo as bases para o desenvolvimento de materiais e aplicações tecnológicas. No entanto, a descoberta dos supercondutores de alta temperatura, cujos mecanismos ainda desafiam a explicação completa pela BCS, continua a motivar intensa investigação interdisciplinar entre física, engenharia e ciência dos materiais (Hirsch, 2009).

Supercondutividade de Baixa Temperatura (LTS) vs. Alta Temperatura (HTS)

A evolução da supercondutividade pode ser compreendida a partir de uma distinção fundamental entre dois grandes grupos de materiais: os supercondutores de baixa temperatura (LTS – Low-Temperature Superconductors) e os supercondutores de alta temperatura (HTS – High-Temperature Superconductors). Esta divisão não se baseia apenas nos valores absolutos de T_c , mas sobretudo nas suas implicações tecnológicas, nos mecanismos físicos subjacentes e nas exigências de engenharia associadas à sua aplicação.

Supercondutores de Baixa Temperatura (LTS)

Os LTS abrangem tanto os materiais do tipo I quanto os do tipo II. Os LTS do tipo I foram os primeiros a serem descobertos, no início do século XX. Já os LTS do tipo II foram identificados posteriormente, a partir das décadas de 1950 e 1960, com o desenvolvimento teórico e experimental da supercondutividade em ligas e compostos metálicos, é nessa classe que se enquadram os supercondutores à base de nióbio, como Nb-Ti e Nb₃Sn, que se tornaram fundamentais para aplicações tecnológicas devido à sua maior capacidade de operar sob campos magnéticos intensos e correntes elevadas.

Os LTS do tipo II são os mais amplamente utilizados em aplicações industriais. Caracterizam-se por temperaturas críticas inferiores a 30 K e por serem bem descritos pela teoria BCS. Entre os exemplos mais relevantes encontram-se o NbTi \approx 9,2 K e o Nb₃Sn \approx 18 K (Banno, 2023), ambos amplamente empregados na construção de magnetos supercondutores para sistemas de ressonância magnética (MRI) (Manso Jimeno et al., 2023), **Figura 3**, aceleradores de partículas e equipamentos de confinamento magnético para fusão nuclear (Schulz et al., 2017).

Estes materiais requerem arrefecimento criogénico, tipicamente com hélio líquido (4,2 K), o que impõe desafios de custo e complexidade operacional. Todavia, apresentam elevada estabilidade mecânica, excelente ductilidade (no caso do NbTi) e reproduzibilidade industrial, fatores que os tornam tecnologicamente maduros e fiáveis. O nióbio, em particular, é um elemento central neste domínio, constituindo a base de ligas e compostos que definem o padrão de desempenho da supercondutividade clássica (Sun et al., 2023).



Figura 3: Um típico sistema de ressonância magnética (MRI), neste caso GE 3 Tesla MR750.

Fonte: (Bray, 2009).

Supercondutores de Alta Temperatura (HTS)

A descoberta dos supercondutores de alta T_c , iniciada em 1986 com os trabalhos de Bednorz e Müller sobre compostos cerâmicos à base de cobre, representou uma mudança de paradigma. Estes materiais apresentam temperaturas críticas superiores à do nitrogénio líquido, o que permite o seu arrefecimento com substâncias criogénicas mais económicas e seguras (Hasan et al., 2024).

Os HTS incluem famílias como $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$ (YBCO ≈ 92 K), $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (Bi-2223 ≈ 110 K) e outros compostos complexos. Apesar das vantagens associadas ao funcionamento a temperaturas mais elevadas (acima de 30K, e frequentemente superior a 77K), os HTS apresentam desafios significativos do ponto de vista de engenharia, são materiais cerâmicos frágeis, difíceis de fabricar em fios ou fitas longas, e a sua coerência de fase é fortemente dependente da orientação cristalina e da pureza estrutural (Hasan et al., 2024). Além disso, o mecanismo microscópico que explica a supercondutividade nestes materiais ainda não é completamente compreendido, não sendo integralmente descrito pelo modelo BCS convencional.

Do ponto de vista prático, os LTS e HTS representam duas vertentes complementares da engenharia da supercondutividade. Os LTS oferecem fiabilidade e maturidade industrial, sendo indispensáveis em sistemas de precisão e alto campo magnético. Já os HTS apresentam um potencial disruptivo para novas aplicações, como linhas de distribuição de energia elétrica sem perdas, **Figura 4**, armazenamento magnético de energia (SMES, de Superconducting Magnetic Energy Storage) e magnetos compactos para transporte por levitação (Maglev).

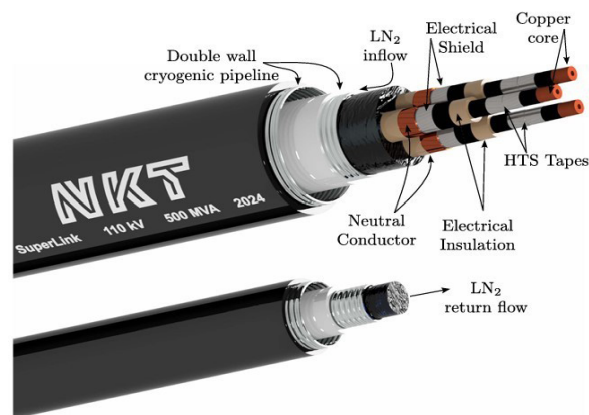


Figura 4: Desenho do cabo SuperLink com três fases num único criostato e caminho de retorno externo para o meio de arrefecimento em LN_2 (azoto líquido).

Fonte: (Tiago Batista de Sousa et al., 2025).

A fronteira entre LTS e HTS define, assim, uma verdadeira divisão tecnológica. De um lado, a engenharia consolidada baseada em metais e ligas convencionais, dominada por países com tradição em criogenia e ciência dos materiais; de outro, um domínio emergente, ainda em desenvolvimento, que promete ampliar o alcance da supercondutividade em contextos mais amplos e acessíveis. Para países emergentes em investigação, como Angola, compreender esta distinção é essencial para definir estratégias de investimento e formação — identificando áreas onde a investigação aplicada possa gerar impacto com base em recursos próprios, como o nióbio.

O Nióbio como Pilar Tecnológico

O nióbio (Nb) ocupa uma posição central no ecossistema da supercondutividade moderna. Elemento de número atômico 41, apresenta uma combinação única de propriedades eletrônicas, mecânicas e térmicas que o tornam essencial tanto na forma metálica pura como em ligas e compostos intermetálicos. A sua versatilidade, associada à maturidade dos processos industriais de produção e à estabilidade da cadeia de suprimentos, faz do nióbio um pilar tecnológico na engenharia de LTS (Schulz et al., 2017).

A liga NbTi constitui o material supercondutor mais amplamente utilizado no mundo, Figura 5, representando aproximadamente 90% do mercado global de LTS. Descoberta na década de 1960, esta liga combina um elevado campo crítico de aproximadamente 10 T e densidade de corrente crítica com excelente ductilidade e tenacidade mecânica, permitindo a sua fabricação sob a forma de fios finos e cabos multifilamentares — condição essencial para aplicações tecnológicas de grande escala.



Figura 5: Mapa mundo a mostrar a localização de minas, depósitos e ocorrências selecionadas de Nióbio e Tântalo.
Fonte: (Schulz et al., 2017).

O processamento típico da liga NbTi envolve técnicas de deformação plástica a frio, tratamento térmico controlado e encapsulamento em matrizes de cobre para estabilização térmica e condução elétrica de contingência. Essa arquitetura composta garante resistência a variações de campo magnético e evita a degradação súbita durante a operação.

As aplicações industriais da liga NbTi são amplas e consolidadas. No domínio da imagiologia médica, ele é o material padrão nos magnetos supercondutores utilizados em sistemas de ressonância magnética nuclear (MRI), devido à sua confiabilidade e compatibilidade com criogenia baseada em hélio líquido. Na física de altas energias, é amplamente empregada nos aceleradores de partículas, como o Large Hadron Collider (LHC) do CERN, onde milhares de magnetos NbTi operam em campos de até 8,3 tesla, assegurando a deflexão precisa dos feixes de partículas em trajetórias circulares de elevada energia.

Para aplicações que exigem campos magnéticos superiores a 10 T, a liga NbTi torna-se insuficiente. Neste regime, o composto intermetálico Nb₃Sn destaca-se como a principal alternativa. O Nb₃Sn apresenta T_c aproximadamente 18 K e campo magnético crítico superior a 20 T, o que o torna adequado para aplicações de alta energia e ambientes extremos.

O processamento do Nb₃Sn é, contudo, mais complexo: trata-se de um material frágil e sensível à deformação, sendo geralmente produzido por reações de difusão entre camadas de nióbio e estanho após a conformação mecânica do fio. Essa limitação mecânica é compensada pelo seu desempenho em campos elevados, que o torna o material preferencial para magnetos de investigação de alto campo e, sobretudo, para os reatores experimentais de fusão nuclear.

Apesar do progresso contínuo dos HTS, o nióbio mantém-se insubstituível em diversos segmentos estratégicos. Esta predominância deve-se a três fatores principais (Banno, 2023):

- **Fiabilidade Tecnológica:** Os sistemas baseados em NbTi e Nb₃Sn possuem décadas de validação operacional, com comportamento previsível, parâmetros bem caracterizados e protocolos de fabrico padronizados.
- **Maturidade da Cadeia de Suprimentos:** A extração, purificação e metalurgia do nióbio encontram-se estabelecidas em escala industrial, com fornecedores consolidados (notadamente no Brasil e em outros países com reservas relevantes). Essa estabilidade garante segurança de abastecimento e custos controláveis.
- **Viabilidade Económica:** Os HTS, embora promissores, permanecem economicamente desafiadores devido ao elevado custo de síntese, à fragilidade estrutural e à complexidade de integração em dispositivos práticos. Em contraste, o nióbio e suas ligas oferecem um equilíbrio ideal entre desempenho, custo e maturidade tecnológica.

Assim, o nióbio continua a constituir o alicerce da supercondutividade aplicada, sustentando tanto as tecnologias consolidadas de baixa temperatura quanto as investigações que pavimentam a transição para sistemas mais avançados. No contexto angolano, a presença de reservas naturais de nióbio, como as de Quilengues, revela um potencial estratégico significativo não apenas como recurso mineral, mas como vetor para o desenvolvimento de competências locais em ciência dos materiais, criogenia e engenharia de sistemas supercondutores.

Metodologia para concepção de uma estratégia para investigação em supercondutividade

A metodologia proposta assenta num plano estratégico de desenvolvimento científico concebido para orientar a consolidação de capacidades nacionais em investigação sobre supercondutividade. Este plano estrutura-se em três pilares interdependentes — formação, infraestrutura e inovação —, que articulam de forma progressiva a capacitação de recursos humanos, o fortalecimento das bases materiais e institucionais, e a promoção da inovação tecnológica orientada para o desenvolvimento sustentável, **Figura 6**.

O primeiro pilar, formação, enfatiza a criação de competências científicas e técnicas através de programas de ensino avançado e cooperação académica internacional, contribuindo diretamente para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4 (Educação de Qualidade) (Barrera, 2022). O segundo pilar, infraestrutura, propõe o estabelecimento e modernização de laboratórios, centros de investigação e plataformas tecnológicas dedicadas à física dos materiais e à supercondutividade, alinhando-se com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura). O terceiro pilar, inovação, visa transformar o conhecimento científico em aplicações industriais e tecnológicas de elevado valor agregado, fomentando a criação de um ecossistema de investigação aplicado e competitivo.

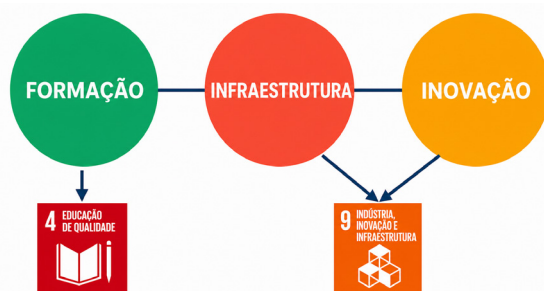


Figura 6: Plano estratégico de desenvolvimento científico.

Fonte: Autor.

A interdependência entre estes três eixos assegura uma progressão metodológica coerente e sustentável, na qual a formação gera capital humano qualificado, a infraestrutura proporciona meios técnicos adequados e a inovação converte o conhecimento em desenvolvimento socioeconómico.

Em sequência, procede-se à análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats), que permitirá identificar e sistematizar os fatores internos e externos determinantes para a implementação bem-sucedida desta estratégia de investigação científica em supercondutividade.

Análise SWOT

A definição de um roteiro estratégico para o desenvolvimento da investigação e da indústria associada à supercondutividade em Angola requer uma abordagem estruturada. Neste sentido, a análise, representada na **Figura 7** constitui uma ferramenta de planeamento estratégico particularmente útil (Petricek et al., 2020), ao integrar variáveis de natureza científica, económica e institucional.

A seguir, apresenta-se uma leitura aplicada ao contexto angolano, com enfoque no potencial do nióbio de Quilengues como eixo de desenvolvimento científico-tecnológico.

Forças (Strengths)

1. **Reservas de nióbio** — As jazidas relevantes de nióbio, particularmente na região de Quilengues (província da Huíla), representam um ativo estratégico de valor global. A presença deste recurso confere ao país uma vantagem comparativa natural no domínio dos materiais supercondutores.
2. **Interesse em diversificar a economia** — As políticas públicas angolanas têm progressivamente enfatizado a necessidade de transição de uma economia dependente do petróleo para um modelo mais diversificado e industrialmente integrado. O investimento em ciência e tecnologia constitui um vetor coerente com essa estratégia.
3. **População jovem e em expansão** — A demografia angolana, marcada por uma população predominantemente jovem, constitui uma reserva potencial de capital humano para programas de formação em engenharia, física e ciências dos materiais, se devidamente orientada e qualificada.

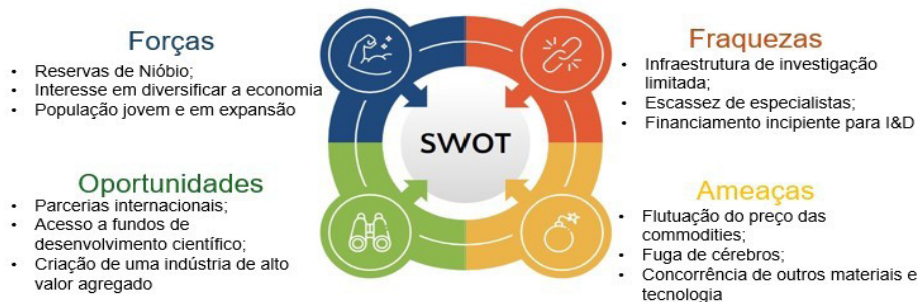


Figura 7: Análise SWOT.

Fonte: Autor.

Fraquezas (*Weaknesses*)

1. **Infraestrutura de investigação limitada** — A escassez de laboratórios equipados e de centros de investigação dedicados a materiais avançados representa uma limitação estrutural significativa. A ausência de capacidades locais para experimentação e caracterização de materiais restringe a autonomia científica.
2. **Escassez de especialistas** — O país enfrenta uma carência de quadros altamente qualificados nas áreas de física do estado sólido, engenharia de materiais, criogenia e instrumentação científica, dificultando a implementação de projetos de supercondutividade a médio prazo.
3. **Financiamento incipiente para I&D** — O investimento nacional em investigação e desenvolvimento (I&D) ainda é reduzido, tanto em termos públicos como privados, o que limita a capacidade de execução de projetos de grande complexidade tecnológica.

Oportunidades (*Opportunities*)

1. **Parcerias internacionais** — A cooperação com instituições de referência especializadas em supercondutividade, representa uma via para transferência de conhecimento, acesso a redes científicas e formação avançada.
2. **Acesso a fundos de desenvolvimento científico** — Existem mecanismos regionais e internacionais de financiamento destinados à promoção da ciência e inovação em países em desenvolvimento, como o Fundo Africano de Desenvolvimento (BAD), a UNESCO e programas da União Europeia, que podem ser mobilizados para projetos de supercondutividade e materiais críticos.
3. **Criação de uma indústria de alto valor agregado** — A transformação do nióbio em ligas, componentes ou dispositivos supercondutores representa uma oportunidade de transição de um modelo extrativista para uma economia baseada no conhecimento, gerando empregos qualificados e exportações tecnológicas.

Ameaças (*Threats*)

1. **Flutuação do preço das commodities** — A dependência das exportações de matérias-primas sujeita o país a oscilações nos mercados internacionais, que podem comprometer a sustentabilidade financeira de projetos de longo prazo.
2. **Fuga de cérebros** — A migração de profissionais altamente qualificados para centros estrangeiros de investigação pode reduzir a capacidade interna de consolidação científica, especialmente em áreas emergentes e de alta especialização.
3. **Concorrência de outros materiais e tecnologias** — A rápida evolução dos HTS e o desenvolvimento de novos materiais com desempenho competitivo (como os supercondutores de ferro e compostos à base de hidretos) podem alterar a relevância relativa do nióbio no médio prazo.

Em síntese, a análise SWOT revela que Angola dispõe de ativos estratégicos singulares — sobretudo a presença de reservas de nióbio e o capital humano emergente — mas enfrenta fragilidades institucionais e tecnológicas que exigem políticas coordenadas de formação, investimento e cooperação internacional. A partir deste diagnóstico, torna-se possível delinear um roteiro estratégico de desenvolvimento que capitalize as forças e oportunidades, enquanto mitiga as fraquezas e ameaças de forma estruturada.

Análise de Benchmarking: Casos de Sucesso e Estratégia Faseada

O benchmarking constitui uma metodologia essencial na formulação de políticas científicas e tecnológicas, ao permitir a comparação entre diferentes contextos nacionais e a identificação de práticas bem-sucedidas que possam ser adaptadas a realidades emergentes. No caso de Angola, compreender como outros países em desenvolvimento conseguiram construir capacidades tecnológicas sustentáveis a partir de recursos limitados é fundamental para delinear um roteiro viável de inserção na economia global do conhecimento.

O Brasil constitui um exemplo paradigmático de como um país com base económica inicialmente extrativista conseguiu evoluir para setores de alto valor tecnológico. A criação da Embraer, nos anos 1970, simboliza a transição de uma indústria dependente de importações para um polo de engenharia aeronáutica de renome internacional (McManus et al., 2024). Esse avanço foi sustentado por três pilares estratégicos (Machado & Hatakeyama, 2018):

- Integração entre universidades e indústria, por meio do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e do Centro Técnico Aeroespacial (CTA);
- Investimento continuado em formação de engenheiros e cientistas;
- Criação de políticas públicas estáveis de fomento à inovação.
- De forma análoga, o setor de bioenergia, com destaque para o programa do etanol, demonstra a capacidade brasileira de alinhar recursos naturais, investigação científica e políticas industriais em torno de um objetivo estratégico.

A Coreia do Sul, nas décadas de 1970 e 1980, enfrentava desafios semelhantes aos de muitos países emergentes: escassez de recursos naturais e forte dependência tecnológica. A estratégia adotada consistiu em articular o Estado, a academia e a indústria (modelo tripla hélice), orientando o investimento público e privado para setores de elevado valor tecnológico (Chen & Sewell, 1996). O resultado foi a consolidação de conglomerados industriais (como Samsung, LG e Hyundai) e a criação de institutos de investigação aplicados, focados em transferência tecnológica e inovação incremental (Chen & Sewell, 1996). Esse modelo permitiu transformar o país num líder global em eletrônica e semicondutores, demonstrando que a ausência de recursos naturais pode ser compensada por políticas consistentes de capacitação tecnológica.

Ambos os casos evidenciam que o sucesso não resulta apenas da disponibilidade de recursos, mas da capacidade institucional de transformar conhecimento científico em valor económico. Essa lição é particularmente relevante para Angola, cuja vantagem comparativa em recursos minerais, como o nióbio, pode converter-se em vantagem competitiva se acompanhada de estratégias de capacitação e inovação.

Com base nas lições de benchmarking, **Tabela 1** e no diagnóstico SWOT apresentado anteriormente, propõe-se uma estratégia faseada de desenvolvimento para a integração da investigação em supercondutividade e materiais avançados no contexto angolano.

Tabela 1.
Parâmetros de configuração da rede.

INDICADORES/ CARACTERÍSTICAS	BRASIL	COREIA DO SUL	ANGOLA (PROPOSTA)
Contexto inicial	Economia extrativista, dependente de exportações primárias (minérios, café, petróleo).	País sem recursos naturais significativos, dependente de importações tecnológicas.	Economia dependente do petróleo e de exportações de baixo valor agregado.
Setores estratégicos	Aviação (Embraer) e bioenergia (etanol).	Eletrônica, semicondutores, automóveis e tecnologias de informação.	Materiais avançados e supercondutividade com base no nióbio.
Modelo institucional	Integração universidade-indústria (ITA-CTA-Embraer).	Modelo "Tripla Hélice": Estado-Academia-Indústria fortemente articulados.	Parcerias universidade-governo-indústria emergentes; estrutura institucional ainda incipiente.
Pilares estratégicos	Formação técnica e científica, política industrial estável, investimento contínuo em inovação.	Planeamento estatal rigoroso, criação de conglomerados industriais e centros tecnológicos.	Formação, infraestrutura e inovação científica como eixos estruturantes.
Instrumentos de política científica e tecnológica	Criação de institutos tecnológicos, políticas de financiamento à inovação (BNDES, FINEP).	Planos nacionais de desenvolvimento, forte investimento estatal em I&D.	Necessidade de criação de fundos nacionais de I&D e laboratórios especializados.
Resultados alcançados	Posição de destaque global em aviação regional e biotecnologia; autonomia em tecnologia estratégica.	Liderança global em eletrônica, semicondutores e inovação aplicada.	Potencial para liderança regional em materiais supercondutores, mediante políticas consistentes.
Desafios enfrentados	Redução das desigualdades regionais e dependência de políticas de longo prazo.	Saturação industrial e necessidade de transição para economia do conhecimento.	Escassez de especialistas, fraca infraestrutura científica e dependência de financiamento externo.
Lições para Angola	Investir em formação técnica e integração universidade-indústria.	Apostar na coordenação Estado-indústria-academia e em políticas de longo prazo.	Alinhar recursos naturais estratégicos (nióbio) com políticas de formação e inovação, promovendo diversificação e valor agregado.

Fonte: Autor.

Planeamento Estratégico para o Desenvolvimento Científico em Supercondutividade

A análise das condições estruturais de Angola, aliada às lições extraídas do benchmarking internacional, permite delinear um roteiro estratégico faseado para o desenvolvimento de competências científicas e tecnológicas no domínio da supercondutividade e dos materiais avançados. O plano propõe uma progressão gradual, baseada em três fases interdependentes, que articulam formação, infraestrutura e inovação. Esta abordagem tem como meta final posicionar Angola como um polo regional de excelência em ciência dos materiais e engenharia aplicada, com o nióbio como eixo central da sua estratégia de especialização inteligente.

Fase 1: Alicerces (Curto Prazo – 1 a 5 anos)

A primeira fase centra-se na criação das condições fundamentais necessárias para o desenvolvimento sustentável de uma comunidade científica nacional em supercondutividade e materiais. O ponto de partida consiste na capacitação de recursos humanos qualificados. Propõe-se a criação de um Programa de Licenciatura e Mestrado em Física de Materiais e Engenharia, com especialização em Supercondutividade e Criogenia Aplicada, coordenado entre universidades nacionais e instituições internacionais parceiras. Paralelamente, devem ser implementadas bolsas de doutoramento no exterior, com cláusulas de retorno e integração em centros nacionais de investigação, de forma a assegurar a retenção do capital científico e evitar a fuga de cérebros.

A consolidação das competências requer a instalação de um Laboratório Nacional de Caracterização de Materiais, dotado de equipamentos essenciais para:

- medições elétricas e magnéticas em baixas temperaturas;
- testes de criogenia e resistência térmica;
- caracterização estrutural e micrográfica de ligas metálicas.

Esta infraestrutura mínima permitirá não apenas o desenvolvimento de investigação básica, mas também a formação prática de estudantes e técnicos, criando uma base experimental para futuras colaborações científicas.

Fase 2: Consolidação e Investigação Aplicada (Médio Prazo – 5 a 10 anos)

Nesta etapa, o foco desloca-se da capacitação inicial para a estruturação institucional e tecnológica. Deve ser criado um Centro de Excelência em Materiais Avançados e Supercondutividade, integrando laboratórios de síntese, análise e simulação computacional. Este centro funcionará como plataforma de convergência entre universidades, indústria mineira e agências governamentais, promovendo a interdisciplinaridade e a transferência de tecnologia.

A investigação deverá privilegiar projetos aplicados, nomeadamente:

- Purificação e processamento do nióbio proveniente de Quilengues, com foco na produção de pós de alta pureza para ligas supercondutoras;
- Desenvolvimento de protótipos experimentais, como pequenos ímãs supercondutores, bobinas de demonstração e sensores de alta sensibilidade (SQUIDS).

A colaboração com o setor mineiro permitirá criar cadeias de valor locais, transformando o recurso natural em conhecimento tecnológico tangível. Paralelamente, Angola deve integrar-se em colaborações científicas internacionais, tornando-se membro associado de programas e consórcios que utilizam supercondutores — como o CERN, o ITER e redes africanas e europeias de ciência dos materiais. Esta inserção facilitará o intercâmbio de conhecimento, o acesso a infraestruturas avançadas e a visibilidade científica global.

Fase 3: Inovação e Sustentabilidade (Longo Prazo – 10+ anos)

A fase final visa consolidar a autonomia tecnológica e a capacidade de inovação, promovendo a transição de uma economia baseada em recursos naturais para uma economia de valor acrescentado e conhecimento científico. A prioridade nesta fase é a industrialização do nióbio, com a criação de unidades de transformação dedicadas à produção de fios e cabos NbTi, além de componentes para magnetos e criossistemas. Essa verticalização permitirá a inserção de Angola em áreas de mercado especializados, como a instrumentação médica, a pesquisa científica e o setor energético.

Deve ser estimulada a emergência de spin-offs académicas e startups tecnológicas, orientadas para criar um ecossistema de inovação sustentável e competitiva:

- Soluções criogénicas e sistemas de refrigeração;
- Serviços de manutenção de equipamentos supercondutores (MRI, aceleradores, magnetos de laboratório);
- Desenvolvimento de dispositivos magnéticos inovadores para aplicações industriais e educativas.

Finalmente, Angola deve posicionar-se como referência regional em ciência dos materiais, liderando iniciativas africanas de investigação e formação em supercondutividade e engenharia aplicada. A criação de redes regionais de colaboração, bem como a oferta de programas de capacitação para países vizinhos, consolidará o papel do país como ator emergente na agenda científica continental.

Em síntese, o roteiro proposto combina visão estratégica, realismo operacional e coerência temporal. Através da implementação progressiva destas fases — alicerces, consolidação e inovação —, Angola poderá converter as suas vantagens geológicas em vantagens tecnológicas, promovendo o desenvolvimento sustentável, a soberania científica e a inserção competitiva na cadeia global de valor da supercondutividade.

Discussão

A implementação de um roteiro estratégico para a supercondutividade em Angola exige não apenas uma sequência lógica de ações, mas também uma reflexão crítica sobre os desafios, riscos e fatores condicionantes que podem afetar o sucesso do plano. Esta secção analisa o planeamento estratégico proposto à luz de critérios económicos, políticos e científicos, e apresenta estratégias para mitigar riscos, maximizar sinergias e responder a críticas legítimas.

Viabilidade Económica e Política

A implementação do roteiro requer investimento sustentado e apoio político de alto nível. Convencer decisores implica demonstrar que a supercondutividade não é apenas um projeto científico, mas um instrumento estratégico para diversificação económica e soberania tecnológica.

Para alcançar este objetivo, é necessário:

- Estabelecer um pacto nacional para a ciência e tecnologia, integrando ministérios, universidades, empresas públicas e privadas. Este pacto deve definir metas claras, mecanismos de financiamento e indicadores de progresso.
- Quantificar os benefícios económicos indiretos, como criação de empregos qualificados, aumento do capital humano e posicionamento de Angola em cadeias globais de alto valor agregado.
- Demonstrar retorno sobre investimento através de projetos-piloto em pequena escala (laboratórios de caracterização, protótipos de ímãs NbTi), que podem servir como provas de conceito tangíveis para decisores.

O sucesso político depende também da capacidade de articular o projeto com prioridades nacionais preexistentes, como energia, saúde e educação tecnológica, garantindo que o roteiro não seja percebido como um esforço isolado ou elitista.

Superar a Dependência de Commodities

Um risco crítico identificado é a dependência de recursos naturais, que historicamente limita o desenvolvimento industrial e tecnológico em economias emergentes. Para evitar que o nióbio permaneça apenas como commodity exportada, o roteiro propõe:

- Transformação vertical do recurso, passando de matéria-prima (pó de nióbio) para componentes tecnológicos de alto valor agregado (fios NbTi, cabos supercondutores, protótipos para magnetos).
- Integração com ciência e formação avançada, garantindo que a riqueza mineral seja convertida em capital humano e capacidade científica endógena.
- Estímulo à inovação aplicada, de modo a criar produtos, serviços e empresas que utilizem o nióbio como insumo estratégico, promovendo industrialização de conhecimento em vez de simples exportação de matéria-prima.

Esta abordagem transforma o nióbio num vetor de desenvolvimento tecnológico, alinhando interesses económicos imediatos com objetivos de longo prazo em ciência e inovação.

Sinergias com Outras Áreas Tecnológicas

- A supercondutividade não é um fim em si mesma, mas um catalisador para múltiplos setores estratégicos na área de eletrónica e instrumentação aplicada, a produção de fios e componentes NbTi permite o desenvolvimento de sensores de alta precisão, sistemas de medição criogénicos e instrumentação para investigação de ponta.
- Estas sinergias fortalecem a justificação económica e social do projeto, ampliando o impacto para além da mineração e indústria pesada.

Resposta aos Críticos e Mitigação de Objeções

O roteiro enfrenta objeções típicas que devem ser antecipadas e respondidas:

- “É muito caro” – A implementação faseada reduz riscos financeiros e permite provar a viabilidade em etapas incrementais, com retorno gradual sobre investimento. Projetos-piloto e laboratórios de demonstração constituem provas de conceito que podem atrair financiamento externo.
- “Há problemas mais prementes” – Saúde, infraestrutura e pobreza são prioridades legítimas. No entanto, o roteiro foi concebido de forma complementar, promovendo a educação e capacitação científica como motores de desenvolvimento socioeconómico, criando empregos qualificados e fortalecendo a capacidade nacional de inovação.
- “Não temos especialistas suficientes” – A estratégia de formação avançada, combinada com bolsas internacionais e parcerias institucionais, visa reverter a escassez de recursos humanos e reduzir a dependência de expertise externa.
- “O mercado de supercondutores é volátil” – A diversificação de aplicações (medicina, energia, ciência básica) e a integração em redes internacionais minimizam a exposição a flutuações comerciais e garantem sustentabilidade tecnológica.

Síntese Crítica e Mitigação de Riscos

O plano estratégico proposto combina progressão faseada, alinhamento com prioridades nacionais e integração internacional, minimizando riscos associados à dependência de recursos, escassez de capital humano e desafios financeiros. A análise crítica demonstra que, embora os investimentos iniciais possam ser elevados, os benefícios estratégicos e tecnológicos de longo prazo justificam a execução do plano.

A mitigação de riscos passa pelo:

- Planeamento incremental e baseado em provas de conceito;
- Criação de mecanismos de governança e acompanhamento de indicadores;
- Estreitamento de parcerias internacionais e regionais;
- Foco em educação e retenção de talento.

Deste modo, Angola tem a oportunidade de converter o nióbio em motor de inovação, promovendo um círculo virtuoso de ciência, tecnologia e desenvolvimento económico, capaz de posicionar o país na vanguarda africana e global da supercondutividade.

Conclusões e Recomendações

- O presente estudo demonstrou que a supercondutividade, quando ancorada no nióbio angolano, constitui uma alavanca estratégica para o desenvolvimento científico, tecnológico e económico do país. A análise crítica dos fundamentos físicos, das aplicações globais e do contexto nacional permitiu identificar oportunidades únicas para transformar um recurso mineral de alto valor em um vetor de inovação e capacitação tecnológica.
- A proposta de roteiro estratégico faseado — estruturado em curto, médio e longo prazo — apresenta-se como viável e coerente, desde que implementada de forma sustentada e gradual, integrando formação de capital humano, infraestrutura mínima de investigação, centros de excelência e redes internacionais de colaboração. Esta abordagem incremental reduz riscos, permite validação em etapas e assegura que Angola não apenas participe da cadeia global de supercondutores, mas construa competências próprias duradouras.
- Para assegurar a implementação bem-sucedida do plano estratégico, destacam-se as seguintes recomendações concretas:
 - Criação de uma Força-Tarefa Interministerial, um órgão coordenador envolvendo os Ministérios da Ciência, Minas e Indústria deve garantir a articulação de políticas públicas, financiamento e acompanhamento estratégico, evitando dispersão de esforços e promovendo a sinergia entre os diferentes setores.
 - Alocação de um Fundo Semente Destinado à criação do programa de licenciatura e mestrado em Física de Materiais e Engenharia, bem como à instalação do Laboratório Nacional de Caracterização de Materiais, este fundo permitirá iniciar atividades piloto, formar recursos humanos e gerar provas de conceito, fundamentais para atrair investimentos adicionais.
 - Estabelecimento Imediato de Acordos de Cooperação Internacional

Parcerias com instituições de referência, como o CERN, ITER, e universidades de excelência, viabilizam a transferência tecnológica, formação avançada e inserção de Angola em redes científicas globais. Estas colaborações são essenciais para acelerar a curva de aprendizagem e consolidar o país como ator relevante na área de supercondutividade.

Em síntese, a convergência entre recursos naturais estratégicos, formação científica robusta e planejamento institucional estruturado permite a Angola não apenas explorar economicamente o nióbio, mas transformá-lo em motor de desenvolvimento sustentável e inovação tecnológica. A execução disciplinada do roteiro proposto oferece uma oportunidade rara: posicionar o país como polo regional de ciência e tecnologia, enquanto constrói uma base sólida para uma economia do conhecimento de longo prazo.

Referências

- Banno, N. (2023). Low-temperature superconductors: Nb₃Sn, Nb₃Al, and NbTi. Em *Superconductivity*. Vol. 6. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.supcon.2023.100047>
- Barrera, L. (2022). The 2030 Agenda for Sustainable Development in Engineering Education: A Criteria Statement Proposal for Graduate Attributes and Professional Competencies. *Proceedings - 8th International Symposium on Accreditation of Engineering and Computing Education, ICACIT*. (1-4) Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICACIT56139.2022.10041577>
- Bray, J. W. (2009). Superconductors in applications; Some practical aspects. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 2533–2539. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2019287>
- Chen, C.-F., & Sewell, G. (1996). Strategies for technological development in South Korea and Taiwan: the case of semiconductors. *Research Policy*, 25(5), 759–783. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(95\)00861-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(95)00861-6)
- Hasan, M. S., Anjuman, J. N., Ali, J., & Jawad, A. (2024). Superconductors Application in Power Sector: A Review. *IEEE Flagship International BIT Conference: Next Generation Applications in Green Energy Technology, BITCON 2024*. (1-5). Disponível em: <https://doi.org/10.1109/BITCON63716.2024.10984453>
- Hirsch, J. E. (2009). BCS theory of superconductivity: It is time to question its validity. *Physica Scripta*, 80(3). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/80/03/035702>
- Machado, M. A., & Hatakeyama, Kazuo. (2018). From Technology Transfer to Disruptive Innovation: The Case of EMBRAER. *2018 Proceedings of PICMET '18: Technology Management for Interconnected World*. (1-9), Disponível em: <https://doi.org/10.23919/PICMET.2018.8481903>
- Kozhevnikov, V. (2021). Meissner Effect: History of Development and Novel Aspects. Em *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* (Vol. 34, Número 8, pp. 1979–2009). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10948-021-05925-8>
- Li, M. S. (2003). Paramagnetic Meissner effect and related dynamical phenomena. Em *Physics Reports*. 376(3) 133–223. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(02\)00635-X](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(02)00635-X)
- Lilia, B., Hennig, R., Hirschfeld, P., Profeta, G., Sanna, A., Zurek, E., Pickett, W. E., Amsler, M., Dias, R., Eremets, M. I., Heil, C., Hemley, R. J., Liu, H., Ma, Y., Pierleoni, C., Kolmogorov, A. N., Rybin, N., Novoselov, D., Anisimov, V., ... Valenti, R. (2022). The 2021 room-temperature superconductivity roadmap. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 34(18), 183002. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac2864>
- Manso Jimeno, M., Vaughan, J. T., & Geethanath, S. (2023). Superconducting magnet designs and MRI accessibility: A review. *NMR in Biomedicine*. 36(9) e4921. <https://doi.org/10.1002/nbm.4921>
- McManus, C., Baeta Neves, A. A., Audy, J. N., & Prata, A. T. (2024). Innovation in Brazil: Universities, Embraer and Petrobras. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 96(4) e20230938. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420230938>
- Mercer, W. J., Pashkin, Y. A. (2023). *Superconductivity : the path of least resistance to the future*. 64(1), 19–46. <https://doi.org/10.1080/00107514.2023.2259654>
- Petricek, P., Klir, R., & Kal'Avsky, P. (2020). Swot Analysis and Its Application in Solving Research Tasks. *NTinAD 2020 - New Trends in Aviation Development 2020 - 15th International Scientific Conference, Proceedings*, 197–201. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/NTAD51447.2020.9379082>
- Qin, W., Cheng, M., Zhu, X., Wang, Z., & Hua, W. (2024). Potential Interpretation of the Meissner Effect in Superconductors: Insights from Vector Magnetic Circuit Theory. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34(9). Art no. 8800809. <https://doi.org/10.1109/TASC.2024.3466521>
- Rossi, L. (2023). *Physica C: Superconductivity and its applications Particle Accelerators and Cuprate Superconductors*. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 614(1), 1354360. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2023.1354360>
- Schulz, K. J., Piatak, N. M., & Papp, J. F. (2017). *Niobium and tantalum* (K. J. Schulz, J. H. DeYoung, R. R. Seal, & D. C. Bradley, Eds.; Professional Paper). Disponível em: <https://doi.org/10.3133/pp1802M>
- Sun, W., Chen, S., Cheng, J., & Wang, Q. (2023). Preparation and Properties of NbTi–Nb₃Sn–NbTi Superconducting Joints. *Journal of Low Temperature Physics*, 213(1), 237–249. <https://doi.org/10.1007/s10909-023-02995-x>



- Supreeth, D. K., Bekinal, S. I., Chandranna, S. R., & Doddamani, M. (2022). A Review of Superconducting Magnetic Bearings and Their Application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 32(3) 1-15. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3156813>
- Tiago Batista de Sousa, W., Boehm, F., Grohmann, S., Noe, M., Willén, D., Alekseev, A., Mansheim, P., Bach, R., Prusseit, W., Hintze, C., Prinz, R., & Michalek, P. (2025). SuperLink: Development and Impacts of a Superconducting Power Cable in a 110-kV Distribution Network. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 35(7) 1-11. <https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3585422>
- Tixador, P. (2010). Development of superconducting power devices in Europe. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 470(20), 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.014>
- Willen, D., Seden, M., Pitzer, M., Roudriges-Zermeno, V., Thidemann, C., Kunert, J., Tjahjanto, D. D., Frohne, C., Holte, O., Wolff, C., Prusseit, W., Hintze, C., Bach, R., Mansheim, P., de Sousa, W. T. B., Noe, M., Alekseev, A., Michalek, P., & Prinz, R. (2025). Development of the Superlink HTS Cable System for Implementation in Munich. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 35(5) Art no. 4802508. <https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3553829>