



## Projeto Aureum: Técnicas Modernas na Construção de Usinas Nucleares no Brasil

NOVAES Andressa<sup>1</sup>; SILVA Amanda<sup>2</sup>; SILVA Denise<sup>3</sup>;  
CASTELLANOS-GONZALEZ Duvan<sup>4</sup>; IDEGUCHI Ricardo<sup>5</sup>;  
MEIRELES Samuel<sup>6</sup>; GUIMARÃES Leonam<sup>7</sup>.

<sup>1</sup> Controle e automação, Universidade Internacional de Curitiba (UNINTER);

<sup>2</sup> Análise de dados, Anhanguera São Bernardo do Campo;

<sup>3</sup> Engenharia de Produção, Universidade Federal do ABC (UFABC);

<sup>4</sup> Termo-hidráulica e análise de acidentes de reatores nucleares, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN);

<sup>5</sup> Gestão de Projetos, Universidade de São Paulo (USP);

<sup>6</sup> Gestão de projetos Instituto Federal de São Paulo (IFSP);

<sup>7</sup> Associação Brasileira de Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDAN).

### Resumo

As mudanças climáticas urgentes e a procura por um futuro energético mais sustentável têm despertado o interesse na energia nuclear, reconhecidamente uma opção promissora para a descarbonização. O Brasil, alinhado a essa tendência mundial estabeleceu metas ambiciosas para expandir sua matriz energética nuclear. Contudo, a construção de novas usinas nucleares tradicionalmente se depara com desafios como longos prazos e elevados custos. Nesse cenário, o projeto *Aureum* surge como uma solução inovadora e promissora. Inspirado pelo espírito das Olimpíadas Nucleares Brasileiras, foi realizado um estudo inicial que comparou o método tradicional de construção de usinas com a adoção de tecnologias disruptivas de modelagem e simulação avançada e práticas de sucesso no mercado de construção civil. Essa abordagem, demonstrou um potencial de redução na construção em média de 6.5 anos para 5.0 anos no tempo e de 7.400 USD/kWe para de 6.018 USD/kWe no custo, o que torna a energia nuclear uma opção mais competitiva e atraente, fundamental para gerar oportunidades econômicas e a disponibilidade de eletricidade sustentável e confiável para as futuras gerações.

**Palavras-Chave:** técnicas inovadoras, BIM, modularização, Projeto *Aureum*.

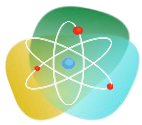
### 1 Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem desencadeado a reavaliação do uso de combustíveis fósseis e um novo olhar sobre fontes da atual matriz energética mundial. O grande objetivo é reduzir as emissões de gases de efeito estufa (EMWG, 2005) e descarbonizar a matriz elétrica. Este cenário tem impulsionado um novo protagonismo a energia nuclear, historicamente vista como controversa (Kartal et al, 2023).

A decisão da União Europeia de reconhecer a energia nuclear como "verde" em 2022 foi um

marco histórico, refletindo uma tendência global de reavaliação do papel dessa fonte de energia não intermitente como outras fontes renováveis, o que maximiza a segurança do suprimento e contribuindo para os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU. Essa decisão, somada ao compromisso de mais de vinte países em triplicar sua capacidade nuclear até 2050, demonstra a sua crescente importância (ABDAN,2024).

No entanto, um dos maiores desafios enfrentados está relacionado aos prazos e custos de construção de novas usinas. Segundo OECD (2020), o cronograma estimado para a



construção de uma usina nuclear é de cinco até seis anos. Com tudo, na prática o tempo real de construção tende a ser de dez anos e alguns reatores atualmente em construção poderiam levar mais de quinze anos após o início das obras.

Por sua vez, o aumento de custo tem sido um problema nos projetos recentes de reatores FOAK (*First of A Kind*) de usinas de geração III/III+. As usinas de Vogtle 3 e 4 nos estados unidos tiveram um orçamento inicial de 4.300 USD/kWe, mas o custo final atingiu 8.600 USD/kWe, um aumento de 100 %. Além disso, usina de Flamanville, na França, teve um aumento no custo de construção de 1.886 USD/kWe para 8.620 USD/kWe, com um incremento de 357% (OECD,2020; Ingersoll et al, 2020).

O Brasil, alinhado a tendência mundial, também estabeleceu metas ambiciosas: o Plano Nacional de Energia 2050 prevê um aumento de até 10 GW na capacidade nuclear nos próximos 30 anos (PNE, 2022). Contudo, a implementação de usinas nucleares no país se depara com obstáculos como prazos de construção extensos e elevação de custos. Esses elementos têm potencial para impactar diretamente a atratividade dos projetos de energia nuclear, influenciar os preços da energia; a percepção do público e diminuir as chances da prospecção de uma cadeia nacional de fornecedores.

Neste contexto, este artigo tem como objetivo apresentar o projeto *Aureum* que emerge como uma iniciativa pioneira, destinada a alcançar a construção de usinas nucleares no país atingindo as expectativas em relação ao tempo e custo de construção, desde a primeira concretagem até o início do comissionamento a frio. Com isso, neste artigo, apresenta-se um estudo inicial, que avalia a diminuição dos prazos e os custos totais em comparação com projetos de construção convencional.

A escolha do nome *Aureum*, vem da palavra latina “dourado,” que visa estabelecer um

paralelo na singularidade e preciosidade da tecnologia nuclear e do mico-leão-dourado, um dos símbolos da luta pela conservação da diversidade biológica. Ambos são fundamentais para a harmonia de seus respectivos sistemas: o mico-leão-dourado para a biodiversidade da Mata Atlântica e a tecnologia nuclear na diversidade da matriz energética brasileira. Para atingir ao objetivo proposto, o projeto possui estratégias e práticas do mercado de megaprojetos de construção civil reconhecida-mente bem-sucedidas; explora ainda recursos tecnológicos. São focos do projeto do *Aureum* para obter seus objetivos: a construção de uma central nuclear; o uso de tecnologia de modelagem e simulação avançada BIM (*Building Information Modeling*) 4D; a construção modular; além de técnicas avançadas de construção na sua concepção

## 2 Metodologia

Considerando o interesse em atingir os objetivos do projeto *Aureum*, a equipe de idealizadores realizou uma avaliação sistemática de um grande volume de publicações provenientes de bases acadêmicas, de entidades do mercado nuclear e da construção civil. A partir das referências de interesse, foi realizado um estudo baseado nos diversos fatores que influenciam a construção de usinas, além de uma revisão detalhada das técnicas de construção mais recentes aplicadas em projetos de sucesso, com foco especial na construção de múltiplas unidades, também foram analisados fatores como infraestrutura necessária, incluindo estudos de caso relevantes e dados de projetos reais para ilustrar a eficácia das técnicas discutidas.

O estudo foi dividido em cinco etapas: avaliação dos fatores que influenciam o tempo e construção de usinas; avaliação de métodos e técnicas avançadas (M&TA); avaliação do cronograma de construção; definição do custo de construção de uma unidade (*Aureum* 1); e



elaboração do cronograma e custo de construção uma central nuclear com quatro unidades.

## 2.1 Fatores que influenciam tempo e custo da construção de uma usina

O tempo e o custo da construção de uma usina nuclear são influenciados por uma série de fatores que se inter-relacionam. Desde o planejamento inicial até a fase de construção, cada etapa do projeto exige atenção e gestão cuidadosa para garantir o sucesso do empreendimento. A otimização de cada um desses fatores é crucial para reduzir custos e prazos, tornando o projeto mais competitivo e atraente (Sutharsan et al, 2011).

Segundo a OECD, (2020), as principais etapas envolvidas na concepção de uma usina nuclear podem ser divididas em três grandes etapas: pré-projeto; projeto e compras e construção.

A etapa 1 considera que a construção de uma usina nuclear passa pelas primeiras estimativas de custo, a definição do local de construção; a elaboração de estratégia de contratação e uso de uma planta como referência para aumentar a precisão nas estimativas. Na etapa 2, no projeto, são desenvolvidos sistemas de qualidade e gerenciamento em tempo real utilizando soluções digitais avançadas. Por fim, na etapa 3 de compras e construção podem ser aplicados avanços técnicos e processos inovadores para aumentar a produtividade, agilizar a tomada de decisões e garantir o monitoramento completo da instalação e construção da usina.

Considerando o exposto anteriormente, este estudo traz a abordagem da etapa 1 do projeto *Aureum*, a etapa de pré-projeto. Assim, como ponto de partida, o foco foi obter uma estimativa de tempo e custo real a partir de uma planta de referência e dados disponíveis na literatura. Ponderando a descentralização de geração de energia no Brasil foi considerado que a região sudeste é a mais adequada para o desenvolvimento do projeto devido à alta demanda de

energia e ao avanço da cadeia produtiva nuclear.

### 2.1.1 Usina de referência

A usina selecionada como referência foi *Size-well-B*, da Inglaterra (reator *Pressurized Water Reactor*- PWR de 1.200MWe). Esta usina foi selecionada ao se destacar como uma referência adequada para os propósitos do projeto *Aureum*, já que possui as seguintes características: reator tipo PWR de grande porte; a construção da usina foi estritamente com métodos convencionais (permitindo uma comparação com métodos avançados); atrasos mínimos durante a construção; e dados disponíveis e nível de detalhe das atividades de construção (Loyd, 2019; Ingersoll et al, 2020; OECD, 2020);

### 2.1.2 Elaboração de estratégia de contratação

Um dos pontos da etapa 1 considera a importância da estratégia de contrato, um plano detalhado que orienta a negociação, elaboração e execução de acordos comerciais, assegurando que os interesses do protejo sejam protegidos e os objetivos do contrato sejam alcançados. Nelas são apontados os fatores de riscos e mitigações, o que incluem as diversas partes interessadas envolvidas. O sucesso da estratégia de contrato depende da capacidade de construir um diálogo aberto e transparente com todos, buscando um consenso em torno do desenvolvimento da energia nuclear no Brasil.

A figura 1 traz mapa de interesse e poder dos stakeholders e categoriza os principais atores envolvidos no projeto *Aureum*, classificando-os com base no seu poder de influência e no nível de interesse no projeto, o que ajuda a determinar estratégias de engajamento e comunicação, garantindo que cada grupo seja abordado de maneira adequada conforme suas necessidades e impacto potencial no desenvolvimento e operação do projeto. Os detalhes relacionados ao *stakeholders* não foram considerados diretamente nos resultados deste estudo; o foco, entretanto, ao longo da construção seu



correto gerenciamento é necessário para que o cronograma não seja afetado por questões não envolvidas diretamente na construção e montagem.



Figura 1. Principais categorias do mapa de stakeholders  
Fonte: Elaborado pelos autores

## 2.2 Avaliação de métodos e técnicas avançadas na construção

Geralmente, é necessário considerar diversas categorias de estruturas dentro de um reator nuclear tipo PWR (tecnologia adotada no Brasil), de acordo com MEISWINKEL (2013) e SCHLASEMAN (2004), essas categorias são divididas em três grupos principais:

*Ilha Nuclear (Grupo A):* compreende estruturas críticas de segurança, como contenção (prédio do reator) e prédio do combustível;

*Ilha da Turbina (Grupo B):* Inclui estruturas que suportam a geração de energia, como o prédio da turbina;

*Sistemas Auxiliares (Grupo C):* Engloba sistemas suplementares necessários durante a operação da usina.

A construção de cada grupo requer metodologias específicas que podem variar desde a modularização até métodos de construção baseada em estruturas, bem como implementação de técnicas como construção de topo aberto, soldagem avançada, e tecnologias digitais como

BIM, VDC, 3D e GPS (Meiswinkel, 2013); (Schlaseman, 2004).

A seguir, são destacadas algumas características dos M&TA utilizadas em construção de usinas, que permitem minimizar atrasos durante a construção.

**2.2.1 Modularização:** a modularização na construção envolve dividir sistemas complexos em módulos menores, que são fabricados separadamente e integrados posteriormente. Esta abordagem não só reduz o tempo de construção, mas também melhora a qualidade reduzindo os custos. A modularização pré-fabricada envolve a fabricação de módulos completos com todos os elementos necessários fora do local de construção principal. Esses módulos são posteriormente transportados e instalados no local de construção, melhorando a eficiência, qualidade e cronograma da construção (Lapp, 1997).

A fabricação de módulos fora do local reduz significativamente as horas de trabalho no canteiro, no entanto, exige a montagem completa dos módulos antes de sua instalação. A montagem e o equipamento dos módulos exigem instalações de suporte bem planejadas para reduzir a necessidade de mão de obra especializada no local de construção. Assim investir antecipadamente na infraestrutura resulta em economia significativas de tempo e custo (IAEA, 2011).

**2.2.2 Técnicas inovadoras na construção civil:** as obras civis estruturais representam uma etapa crucial na construção de usinas nucleares, são as atividades de maior duração no caminho crítico da fase de construção do cronograma. Técnicas inovadoras na construção civil incluem o uso de novos materiais sustentáveis, tecnologias avançadas como impressão 3D e realidade aumentada, e métodos colaborativos desde as fases iniciais do projeto. Essas abordagens visam aumentar a eficiência,





reduzir desperdícios, melhorar a precisão do projeto e oferecer soluções para desafios tradicionais da construção (Soliman, 2022).

**2.2.3 Composição de concreto:** na construção de novas usinas nucleares podem ser utilizados aditivos avançados para concreto que aumentam a resistência e trabalhabilidade do material. Tecnologias como o concreto autoadensável (SCC), de alto desempenho (HPC), e em pó reativo são utilizadas, reduzindo a quantidade de concreto necessária (Westinghouse-NRC, 2007). O SCC é um concreto com alta fluidez e resistência à segregação, que se consolida sem a necessidade de compactação mecânica externa, a colocação é mais fácil quando comparado com o concreto convencional, seu uso reduz a mão de obra em instalações de concreto pré-moldado e aumenta a produtividade (EPRI, 2022).

**2.2.4 Instalação de topo aberto:** uma instalação de topo aberto é um espaço dentro de um edifício ou estrutura onde o teto é removido ou parcialmente aberto. Essa abertura permite acesso direto à parte superior da instalação, facilitando a instalação, manutenção e inspeção de equipamentos. Em plantas nucleares, essas instalações são especialmente relevantes devido à complexidade dos sistemas e à necessidade de garantir a segurança operacional. As novas usinas nucleares que utilizam o método de construção “*open top*” precisam de guindastes de elevação com capacidade para cargas muito pesadas e áreas amplas e pavimentadas para armazenamento e montagem dos módulos, diferentemente dos métodos de construção tradicionais (IAEA, 2011).

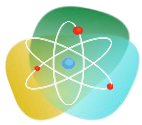
**2.2.5 Técnicas avançadas de soldagem:** a solda de arco submerso (SAW) de múltiplos fios, uma aplicação da solda em arco submerso que usa mais de um fio de eletrodo consumível, permite uma taxa de deposição de material de até 100 libras por hora (aproximadamente 45

quilos por hora) em comparação com a taxa de deposição de 33 libras por hora (aproximadamente 15 quilos por hora) no método SAW convencional (Schlaseman, 2004). Isso significa que o tempo de soldagem dos componentes relevantes é reduzido em 66%. Além disso, métodos adicionais, como solda robótica e revestimento vertical de tiras, tem uma maior aplicabilidade para fabricação de componentes em campo. Há também, a solda orbital, que é uma melhoria para soldas de tubulação em campo, que automatiza o processo de solda do tipo GMAW e oferece vantagens como facilitar a solda em áreas de difícil acesso.

**2.2.6 Forma de aço para concretagem:** o método mais utilizado no mercado para a concretagem de estruturas é a utilização de formas de madeira, o que exige tempo para realizar a amarração da armadura, instalação das formas e remoção das formas após a cura da concretagem. A utilização de concreto revestido por formas de aço, consiste em utilizar chapa de aço como revestimento que ao mesmo tempo fazem o papel de forma, promovem uma maior resistência, além de eliminar a necessidade da remoção das formas após a secagem do concreto, diminuindo assim o tempo necessário para esta atividade (Schlaseman, 2004).

**2.2.7 Dobra de tubos para evitar soldagem:** dobra de tubos é uma tecnologia disponível aproximadamente 30 anos, desenvolvida para diminuir o número de soldas de um projeto com intuito de diminuir o seu tempo e custo. Uma inspeção de solda ASME custa aproximadamente \$5.000 por solda inspecionada, já existem no mercado máquinas portáteis de dobra com capacidade para dobrar tubos de até 60 polegadas (Schlaseman, 2004).

**2.2.8 Lançamento de cabos e conectorização tração de cabos:** outra atividade que teve avanços nos últimos anos foi a atividade de tração de cabo que consiste no ato de puxar os



cabos através das bandejas e eletrocalhas, no método tradicional uma corda guia é lançada no sentido inverso do encaminhamento pelo qual os cabos serão puxados, amarrada no cabo ou feixe de cabos, um lubrificante é aplicado para reduzir o atrito entre o cabo e a superfície do bandejamento, e então um dispositivo de tração puxa a corda trazendo com ela os cabos. Técnicas mais atuais como o uso de lubrificantes de alta performance, o uso de máquinas de tração automática, bem como polias e roletes nas eletrocalhas, pode reduzir consideravelmente o tempo destas atividades (Schlaseman, 2004).

### **2.2.9 Emendas e terminações de cabos:**

Mesmo com os métodos para melhoria do processo de tração dos cabos, emendas ainda serão necessárias em campo, principalmente quando falamos no contexto da modularização, pois possibilitam que os módulos sejam mais completos, já sendo fabricados com os cabos posicionados, além das terminações ao final, pois, após alocados os cabos devem conectar equipamentos o que faz necessária a correta terminação. Neste quesito o método avançado que toma destaque é a tecnologia *cold shrink* (Termo retráteis a frio) que comparadas aos métodos tradicionais como termo retráteis a quente e pré-montadas, trazem inúmeros benefícios, como Instalação mais rápida e segura, a não necessidade de uma fonte de calor, treinamento mínimo necessário e design do corpo da emenda de uma peça (Schlaseman, 2004).

**2.2.10 BIM 4D:** O BIM 4D (*Building Information Modeling*) ou Modelagem da Informação da Construção é uma ferramenta avançada que inclui a dimensão do tempo na modelagem tridimensional, possibilitando uma simulação realista da edificação e uma abordagem integrada para criar e gerenciar informações de projetos de construção ao longo de seu ciclo de vida. O uso de software especializado

possibilita o acompanhamento da progressão do projeto ao longo do tempo, detectando possíveis conflitos, aprimorando a sequência de tarefas e controlando o tempo de realização. Análise de interferência, otimização de recursos, avaliação de cenários e exclusão de riscos são oferecidas por meio de modelagem e simulação avançadas, melhorando eficiência e precisão desde o projeto até a operação da usina, numa gestão eficaz de recursos e a detecção de possíveis questões de segurança e qualidade (Yasser, 2023).

Os métodos de construção avançados descritos anteriormente poderiam permitir realizar um estudo mais real do tempo mínimo de construção que seria necessário na construção das usinas propostas no Projeto *Aureum*. No entanto, devido à fase atual do estudo e às informações disponíveis na literatura, foi possível apenas aplicar alguns desses métodos, conforme os fatores de ganho apresentado no anexo A1. Assim, ao aplicar esses métodos na estimativa de tempo e custo do Projeto *Aureum*, oferece-se uma ferramenta que permite abordar aspectos como a otimização do planejamento, a redução de custos, o aumento da eficiência e a melhoria da qualidade. Dessa forma, este estudo tem o potencial de se tornar um marco na construção de usinas nucleares no Brasil, possibilitando a avaliação da viabilidade de construção do Projeto *Aureum*.

### **2.3 Cronograma de Aureum-1: Tempo de construção previsto**

Um atributo essencial para obter sucesso na construção de uma usina nuclear avançada é um cronograma de construção otimizado. O cronograma de construção de *Aureum-1* foi realizado utilizando como base o método proposto por (Lloyd, 2019), bem como considerando a tecnologia de reatores de potência adotada no Brasil, ou seja, reatores do tipo PWR



avancados de geração III+. O modelo proposto por LLOYD (2019) foi selecionado por ter sido desenvolvido com base na construção da usina de *Sizewell-B* (usina selecionada como referência neste estudo).

O Projeto *Aureum* prevê uma central nuclear composta por 4 unidades, cada uma com capacidade de gerar 1.000 MWe, um investimento estratégico capaz de promover o crescimento econômico e tecnológico do país, assegurando ainda o fornecimento de energia a longo prazo e cumprindo os objetivos do PNE 2050 (Brasil, 2022). Os benefícios abrangem desde a diminuição de gastos, através da negociação de preços mais favoráveis com fornecedores, otimização de recursos e aceleração de prazos, levando em conta a curva de aprendizado e a utilização simultânea da mão obra. Considera ainda que a central fomenta a cadeia de suprimentos, fortalecendo a indústria nacional, gerando empregos qualificados e reduzindo a dependência de fornecedores estrangeiros, além de permitir um maior controle sobre a qualidade dos produtos e serviços, garantindo a segurança e a confiabilidade das usinas.

A construção de cada uma das quatro unidades foi organizada em três grupos: Ilha Nuclear (Grupo A), Ilha da Turbina (Grupo B) e Sistemas Auxiliares (Grupo C), conforme descrito na seção 2.2. Além disso, para estimar o tempo de construção de cada unidade, foi realizado um ajuste no tempo de desenvolvimento das atividades que compõem cada grupo, aplicando-se um fator de escala conforme a equação 1 (Lloyd, 2019).

$$t_{A1} \left[ \frac{d}{kWe} \right] = t_{ref} \left( \frac{P_{A1}}{P_{ref}} \right)^{(n-1)} \quad (1)$$

sendo,  $t_{A1}$  o tempo de calculado por atividade;  $t_{ref}$  o tempo de referência;  $P_{A1}$  potência do reator *Aureum 1*;  $P_{ref}$  potência do reator referência, e  $n$  é fator de escala conforme anexo A2.

O intervalo de tempo analisado, abrangeu o período entre a primeira concretagem até o início do comissionamento a frio. Foram consideradas 94 atividades principais, que conformam a construção dos três grupos apresentados anteriormente. Após obter o cronograma de construção de *Aureum-1* por métodos convencionais, foi realizada a estimativa de tempo de construção considerando os M&TA apresentados na seção 2.2. O ganho de tempo foi calculado baseado em lições aprendidas reportadas na literatura. Foram aplicados os métodos de instalação de topo aberto, modularização, emendas e terminações de cabos e formas de aço para concretagem.

Os fatores foram calculados em porcentagens e aplicados à atividade em que for aplicável conforme apresentado no anexo A2.

#### 2.4 Custos estimados para a construção de *Aureum-1*.

De acordo com GATES (2020) existem dois métodos para realizar a estimação do custo de uma usina nuclear: “*Top-Down*” e “*Bottom-up*”. O método selecionado para estimar o custo de *Aureum-1* foi o “*Top-Down*”, já que na etapa atual não tem maiores detalhes que permitiriam realizar uma estimação do tipo “*Bottom-up*”, além disso ao utilizar o modelo do tipo “*Top-down*”, pode ser considerado que o projeto pode ser desenvolvido independentemente do tipo de tecnologia a ser utilizada. No entanto, destaca-se que o cálculo está vinculado à potência para a qual as usinas precisariam ser projetadas, ou seja, 1.000 MWe. Pode-se considerar que os custos das novas gerações de usinas nucleares são compostos por 16% de operação e manutenção, 12% de combustível, sendo dominados essencialmente pelos custos de capital que representam em torno do 72% do custo total de produção (OECD, 2020). Por tanto, os custos de produção a partir



de uma usina nuclear são especialmente sensíveis ao custo de capital.

Os custos de investimento de uma usina nuclear, abrangem o projeto, construção e comissionamento, sendo divididos em *Overnight-Capital Cost* (OCC) e custos de financiamento. O OCC inclui os custos de construção da usina desconsiderando efeito do tempo em termos de juros financeiros ou pagamentos descontados, geralmente expressado em (USD/kWe) (Ingersoll et al, 2020; OECD, 2020). Assim, para estimar o custo do Projeto *Aureum* foi considerado principalmente o OCC, o qual foi dividido nas seguintes categorias de acordo com ELA-GIN (2000) considerando os valores reportados para a Usina de *Sizewell-B* (usina de referência para no cronograma):

*Custos diretos:* Terraplanagem (0,2%); equipamentos do reator (23,2%); equipamentos da Turbina (5,9%); equipamentos elétricos (13,5%); equipamentos de troca de calor (2,5%) equipamentos *miscelâneas* (7,1%); e construção (23,4%);

*Custos indiretos:* Projeto e engenharia (11,7%); gerenciamento do projeto (0,9%); comissionamento (3,8%);

*Outros custos:* Treinamento (2,9%); impostos e seguros (0,4%); transporte (0,1%); custos do proprietário (2,4%); contingências (2,0%).

Considerando que o Projeto *Aureum* deve ser implementado no Brasil, o valor de OCC pode variar significativamente em função de questões como a partes interessadas, cadeia de suprimentos, o licenciamento e projeto do reator. Além disso, segundo OECD (2020), o valor de OCC é fortemente dominado pelo amadurecimento do projeto do reator como representado na figura 2. Nesse sentido e considerando que para uma fase inicial a finalização do projeto da usina *Aureum-1* deveria ser em torno de 80%, o valor de OCC inicial seria de 5.000 USD/kWe.

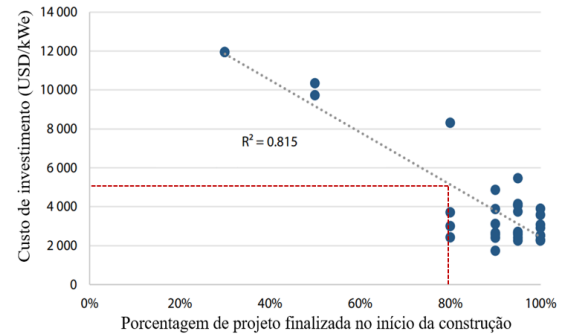


Figura 2. Custo capital e porcentagem de projeto finalizado. Fonte: adaptado de OECD (2020).

Após o estabelecer o valor de custo na construção do reator, foi calculada a diminuição nos custos diretos de OCC, considerando principalmente o item de construção, já que este é dependente da diminuição no tempo calculado no cronograma. O valor reduzido foi calculado pela equação 2 (Lloyd, 2019).

$$\% CR_{M\&TA} = \left(1 - \frac{t_{M\&TA}}{t_c}\right) 100\% \quad (2)$$

sendo, %  $CR_{M\&TA}$  o custo reduzido se aplicar M&TA;  $t_c$  o tempo da atividade por método convencional;  $t_{M\&TA}$  tempo de atividade por M&TA.

## 2.5 Cronograma de construção de múltiplas unidades

A estimativa do cronograma de construção das quatro unidades do Projeto *Aureum*, foi realizada em função do tempo de construção estimado no cronograma de construção de planejado para *Aureum-1*(seção 2.4) Neste sentido, foi estimado a redução do tempo e custo na construção das usinas, considerando o modelo da curva de aprendizado proposto por OECD (2020), assim estabeleceu-se um padrão de avaliação desde a construção de *Aureum-1* (*First of a Kind-FOAK*) até *Aureum-4* (*4°OAK*).

Pode-se dizer que o ganho de tempo no cronograma de uma usina NOAK (*N<sup>th</sup> of a Kind*) em relação a uma FOAK não se dá em um ganho real de tempo, mas sim em uma diminuição dos





riscos de atraso. Na NOAK o acúmulo de experiência e lições aprendidas com as centrais anteriores, permite aplicar uma cadeia de suprimentos e uma rotina de trabalho que diminuem o risco de possíveis atrasos.

A estimativa da redução no tempo de construção do Projeto *Aureum* foi realizada levando em consideração os parâmetros apresentados por STEWART et al (2023) que destaca que tecnologia do FOAK causa, em média, um atraso de construção de 23%, sendo que a maior parte disso é motivada por erro humano. STEWART et al (2023) ressalta que os reatores APR1400s construídos em Barakah registraram uma taxa de aprendizagem de 23% entre as centrais FOAK e 4<sup>o</sup>OAK, implicando em uma diminuição de 11% no fator de erro a cada nova central construída.

Além disso grande parte do possível atraso da FOAK vem da possibilidade de alterações de projeto no decorrer da instalação da usina, seguindo as técnicas avançadas descritas neste artigo, essas alterações tendem a ser evitadas. No entanto, durante a construção de uma NOAK, assume-se que a probabilidade de que uma alteração seja necessária, sem que seja requisitada por alguma alteração de regulamentação é quase zero.

Para o Projeto *Aureum*, o modelo foi utilizado para representar três cenários: construção por método tradicional, M&TA e M&TA + BIM. A técnica “M&TA + BIM” pode reduzir essa possibilidade de erro humano como descrito na seção 2.2 pois é uma ferramenta que permite levar um gerenciamento efetivo do projeto.

Levando em consideração os benefícios de projetos com unidades múltiplas e construção em serie (OECD, 2020) foram adotadas as seguintes premissas:

- Ajuste do custo do valor planejado da primeira usina considerando um aumento de 48% em relação ao valor estimado. Este valor foi calculado considerando a média

do aumento do custo de usinas em relação à construção de reatores AP1000, EPR e APR 1400, conforme Anexo 3;

- Construção de reatores em pares, reduzindo a construção do segundo reator em torno de 15% e uma redução adicional de 5% no segundo par de unidades;
- Redução de custo devido à redução no tempo de construção da usina, calculado pela equação 2.

### 3. Resultados

Os resultados obtidos neste estudo que fazem referência à redução de tempo e custos na construção de usinas nucleares no Brasil, são apresentados com base em dois tópicos:

1. Cronograma e custo estimado na construção de *Aureum-1*(FOAK), desenvolvido a partir da metodologia apresentada nas seções 2.3 e 2.4;
2. Cronograma e custo estimado na construção do Projeto *Aureum* considerando as quatro unidades propostas.

#### 3.1 Cronograma e custo de construção planejados para *Aureum-1*

O cronograma reduzido elaborado para calcular o tempo estimado na construção de *Aureum-1*, comparando os métodos tradicional e M&TA é apresentado na figura 3.

Os métodos foram aplicados aos três grupos que compõem a usina, como resultado foi possível observar uma redução de 15,9% na ilha nuclear, 15,5% na ilha da turbina e 20,3 % nos sistemas auxiliares, tendo em média uma redução de 17,2% na construção dos 3 prédios. Desta forma, o tempo de construção previsto para *Aureum-1* utilizando o método tradicional é de aproximadamente 5,3 anos, no entanto ao aplicar M&TA esse tempo de construção seria reduzido para 4,4 anos.

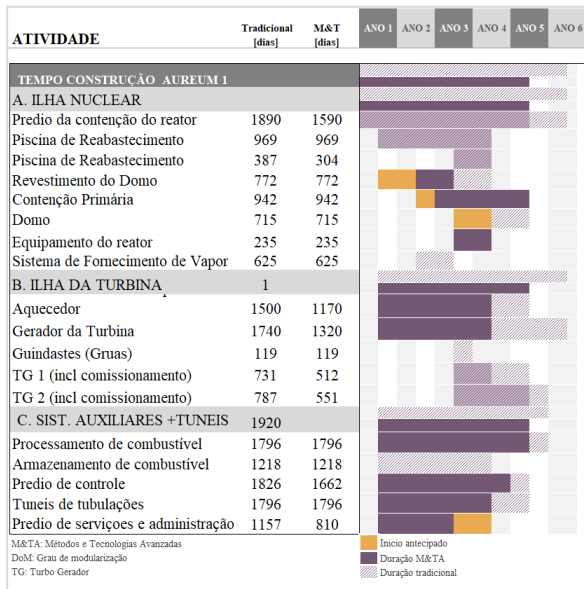


Figura 3. Cronograma de construção *Aureum-1*. Fonte: elaborado pelos autores.

O custo estimado na construção de *Aureum-1* é apresentado na tabela 1. Foi considerado o custo global de OCC, abrangendo custos diretos, indiretos e outros.

Tabela 1. OCC estimado para *Aureum-1*. Fonte: elaborado pelos autores.

Item	Custo (USD/kW)	M&TA (USD/kW)
<i>Custos diretos</i>		
Terraplanagem	10	10
Equipamentos do reator	1.160	1.160
Equipamentos da Turbina	295	295
Equipamentos elétricos	675	675
Equipamentos - troca de calor	125	125
Equipamentos diversos	355	355
Construção	1.170	984
<b>Total custos diretos</b>	<b>3.790</b>	<b>3.604</b>
<i>Custos indiretos</i>		
<b>Total custos indiretos</b>	<b>820</b>	<b>820</b>
<i>Outros custos</i>		
<b>Total outros custos</b>	<b>390</b>	<b>390</b>
<b>Total</b>	<b>5.000</b>	<b>4.814</b>

O fator de redução de custo somente foi aplicado na atividade de construção, devido à redução no tempo do cronograma. Como resultado, houve uma redução de 15,8% no custo de construção e uma redução de 3,7% no OCC

passando de um valor inicial de 5.000 USD/kWe para 4.814 USD/kWe.

### 3.2 Cronograma e custos de construção estimados considerando FOAK e NOAK do Projeto *Aureum*

A figura 4 compara o tempo de construção das 4 unidades considerando três cenários: tempo de construção por métodos tradicionais, uso de M&TA, e uso de M&TA+ BIM. O primeiro ponto da figura, representa o tempo planejado, e os demais pontos representam o tempo de construção da FOAK à 4º-OAK considerando o atraso máximo relacionado a taxa de erro humano.

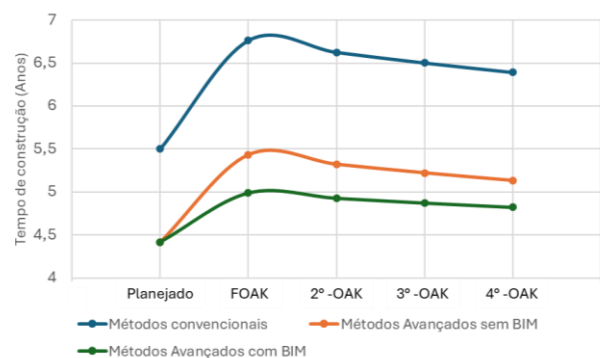
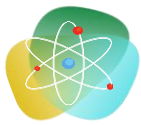


Figura 4. Comparação do tempo de construção do Projeto *Aureum* a partir de métodos de construção Tradicional, M&TA, e M&TA+BIM.

Fonte: elaborado pelos autores.

A partir dos resultados, foi possível observar que o tempo de construção da *Aureum-1* (FOAK) a partir do método tradicional pode ser reduzido de 6.5 anos para 5.4 anos e 5.0 anos utilizando os métodos de construção M&TA e M&TA+BIM, respectivamente. Com a utilização do BIM é possível reduzir a taxa de erro humano, reduzindo assim o risco de atraso de construção da FOAK, assim, levando em consideração a taxa de aprendizado descrita na seção 2.5, cada novo reator tem um uma taxa de erro ainda menor.



Em relação a Aurem-4 (4ºOAK) o tempo de construção utilizando o método tradicional passaria de 6,1 anos para 4,8 anos aplicando o M&TA+BIM. Assim, aplicando aos métodos M&TA, bem como, o BIM em média poderia se reduzir o tempo de construção da usina em 21,6%. Se as 4 unidades de Aureum forem construídas em série, o projeto teria uma duração mínima de 19,7 anos. No entanto, nesta proposta considerou-se a construção das usinas em pares. A figura 5 mostra o cronograma de construção planejado para as 4 unidades do projeto Aureum considerando a aplicação de M&TA+BIM.

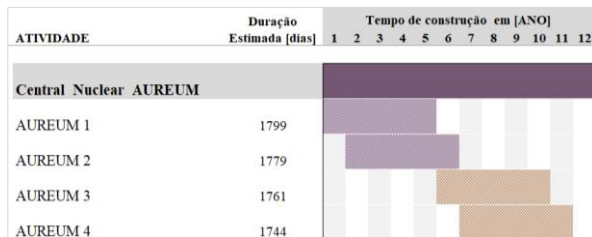


Figura 5. Cronograma de construção Projeto Aureum. Fonte: elaborado pelos autores.

Aureum-2 seria construída com um ano de diferença a partir do início da construção da Aureum-1. A construção de Aureum-3 e Aureum-4, começaria assim que fosse finalizada a construção de Aureum-1 e Aureum-2, respectivamente. Desta forma, o tempo mínimo necessário para a construção das quatro usinas seria de 11 anos.

Em relação ao custo da central, foi considerado estabelecer a relação entre o tempo e o custo de construção conforme apresentado na seção 2.5. O custo OCC calculado para cada cenário avaliado, são apresentados na tabela 2. Em média o valor reduzido de OCC para as 4 unidades é aprox. 5% de quando comparado o método de construção tradicional com o método M&TA+BIM

Tabela 2. Comparação de OCC estimado da FOAK - 4ºOAK da central de Aureum comparado os métodos Tradicional, M&TA e BIM

Usina	Trad. [\$/kW]	M&TA [\$/kW]	M&TA +BIM [\$/kW]	Red.Cto [%]	Custo [\$/Bi]
Plan.	5.000	4.814	4.814	3,7%	4,8
A1	7.400	7.125	7.035	4,9%	7,0
A2	6.290	5.792	5.975	5,0%	5,9
A3	5.976	5.287	5.673	5,1%	5,6
A4	5.677	4.826	5.387	5,1%	5,3
<b>Total</b>	<b>6.336</b>	<b>5.758</b>	<b>6.018</b>	<b>5,0%</b>	<b>24,1</b>

A1:Aureum-1, A2:Aureum-2, A3:Aureum-3, A4:Aureum-4, Trad: Método tradicional, M&TA: Métodos e Tecnologias Avançadas, BIM: modelo de gerenciamento; \$Bi: Bilhões de dólar.

O modelo adotado para estimar o valor de OCC do Projeto Aureum foi o M&TA+ BIM. Dessa forma, em média o custo mínimo do projeto seria em torno de USD 24,1 bilhões. A figura 6 representa a curva de aprendizado estimada para a construção da central, considerando a relação entre tempo e custo na construção de cada unidade.

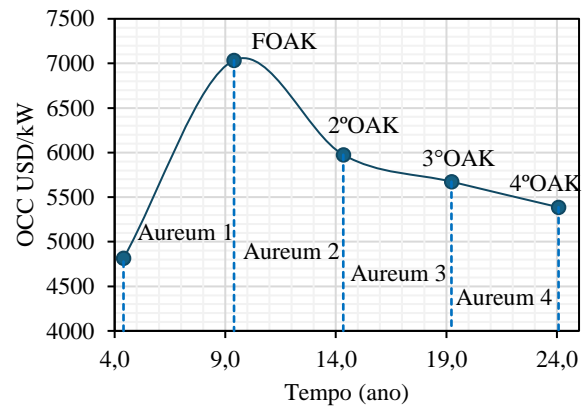


Figura 6. Curva de aprendizado estimado na construção do Projeto Aureum M&TA + BIM. Fonte: elaborado pelos autores.

Como resultado, observa-se que o valor de OCC entre Aureum-1 e Aureum-4 foi deduzido passando de 7.035 USD/kW para 5.387 USD/kWe, representando uma redução de 23% entre a construção da primeira e a última unidade. Assim em média o valor de construção das 4 usinas estaria em torno de 6.018 USD/kWe.

A diferença entre o valor planejado e o valor calculado seria de apenas de 19,9 %. Esse



percentual está em linha com o exposto para as usinas de *Shin Kori 3* e 4, na Coreia, que apon-taram para um aumento em torno de 24%, em relação ao OCC previsto (OECD, 2020).

#### 4. Conclusões e considerações finais

Este artigo apresentou um estudo de redução de tempo e custo de construção de usinas nucleares de grande porte no Brasil. Nesse contexto, foi proposto a construção de uma central nuclear composta por quatro unidades, projeto denominado *Aureum*, utilizado como caso de estudo na avaliação do impacto no custo e tempo de construção. A estimativa foi realizada considerando os métodos tradicionais, M&TA, construção de múltiplas usinas e aplicação do BIM.

Com o uso de M&TA em conjunto com o BIM o tempo estimado de construção de *Aureum-1* foi reduzido de 6,5 anos para 5 anos e o custo de OCC passou de 7.400 USD/kWe para 7.035 USD/kW, uma redução em torno do 5%. O tempo estimado de construção de *Aureum-4* foi diminuído de 6,1 para 4,5, com um custo de 5.387 USD/kWe. A construção por pares das quatro unidades levaria cerca de 11 anos com um custo médio de 6.018 USD/kWe.

Com o exposto anteriormente, foi possível verificar que as metodologias avaliadas neste estudo seriam essenciais para a construção de novas usinas de grande porte no Brasil. Assim, este estudo tem o potencial de se tornar um marco na construção de usinas nucleares no Brasil, possibilitando a avaliação da viabilidade de construção de um projeto de usinas nucleares de grande porte.

Com tudo, neste estudo não foram considera-dos fatores como análise de riscos na constru-ção e questões de financiamento. A identifica-ção de riscos para a construção de uma usina nuclear é essencial para garantir o financia-mento do projeto. Diversos fatores no planeja-mento podem influenciar os custos da constru-ção, tornando a avaliação desses riscos um ele-mento decisivo nas decisões de investimento, considerado especialmente em projetos recen-tes de usinas nucleares FOAK.

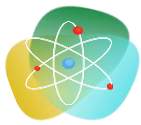
Como trabalho futuro, pretende-se realizar uma análise detalhada de riscos na construção do Projeto *Aureum*, determinando seu impacto no tempo e custo de construção, isto, levando em consideração diversos aspectos, como a es-cala do investimento, a complexidade nas to-madas de decisão envolvendo diversos *stakeholders*, e os riscos associados à tecnolo-gia, à organização, ao licenciamento, à regula-mentação e ao financiamento.

Além disso uma oportunidade significativa de melhoria na redução nos custos e prazos na construção será a avaliação de fatores logísticos e do grau de modularização adotado.

#### 5. Agradecimentos

A Atech pelo apoio e disponibilidade durante o desenvolvimento do desafio. À Associação Brasileira de Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDAN) pela organização das Olimpíadas Nucleares Brasileiras (ONB 2024). Aos mentores Leonam dos Santos e Patricia Wieland pela orientação.





## 6. Referências

ABDAN. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES NUCLEARES-ABDAN. **Olimpíadas Nucleares Brasileiras- Hackapower 2024**. Disponível em <https://eventos.abdan.org.br/hackapower2024/termos-e-condicoes-onb-2024/> (Acesso em 03/03/2024).

ECONOMIC MODELING WORKING GROUP (EMWG). **Cost Estimating Guidelines For Generation IV Nuclear Energy Systems**, 2005.

ELAGIN, Yu P. **Reduction of capital costs of nuclear power plants**, NEA (Nuclear Energy Agency). p. 25-30, 2000. – EPRI- Overview Of Advanced Construction Techniques For Optimizing New Nuclear Projects, May 2022.

GATES, Philip et al. **Sources of cost overrun in nuclear power plant construction call for a new approach to engineering design**. *Joule*, v. 4, n. 11, p. 2348-2373, 2020.

INGERSOLL, Eric et al. The ETI Nuclear Cost Drivers Project Full Technical Report. **Energy Systems Catapult: Birmingham, UK**, v. 3, 2020.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Construction technologies for nuclear power plants**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. (IAEA nuclear energy series, NP-T-2.5).

KARTAL, Mustafa Tevfik et al. **Effectiveness of nuclear and renewable electricity generation on CO2 emissions: Daily-based analysis for the major nuclear power generating countries**. *Journal of Cleaner Production*, v. 426, p. 139121, 2023.

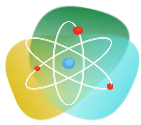
LAPP, Christopher W.; GOLAY, Michael W. Modular design and construction techniques for nuclear power plants. **Nuclear Engineering and Design**, v. 172, n. 3, p. 327-349, 1997.

LLOYD, Clara Anne. **Modular manufacture and construction of small nuclear power generation systems**. 2019. Tese de Doutorado.

MEISWINKEL, Rüdiger; MEYER, Julian; SCHNELL, Jürgen. **Design and construction of nuclear power plants**. John Wiley & Sons, 2013.

NOVAES, Andressa; SILVA, Amanda; SILVA, Denise; CASTELLANOS-GONZALEZ, Duvan; IDEGUCHI, Ricardo; MEIRELES, Samuel; GUIMARÃES, Leonam.

**MEMORIAL DE CÁLCULO - Projeto Aureum: Técnicas Modernas na Construção de Usinas Nucleares no Brasil**, 2024. Disponível em [https://drive.google.com/file/d/1SDiKTIG4dbJy4N5tm3Vm0FzfISLCZhzI/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1SDiKTIG4dbJy4N5tm3Vm0FzfISLCZhzI/view?usp=drive_link).



ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT-OECD. **Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders.** NEA No. 7530. Paris: OECD, 2020.

PNE. **PNE 2050 Plano Nacional de Energia, 2022.** Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050> (Acesso em: 03/05/2024).

SCHLASEMAN, Caroline. **Application of advanced Construction Technologies to New Nuclear Power Plants** - U.S, Department of Energy, September 24, 2004.

SOLIMAN, Ahmed et al. Innovative construction material technologies for sustainable and resilient civil infrastructure. **Materials Today: Proceedings**, v. 60, p. 365-372, 2022.

STEWART, William Robb; SHIRVAN, Koroush. **Construction schedule and cost risk for large and small light water reactors**, USA, 2023.

SUTHARSHAN, Balendra et al. **The AP1000™ reactor: passive safety and modular design.** *Energy Procedia*, v. 7, p. 293-302, 2011.

WESTINGHOUSE - NRC AP, **1000 ASME Component Review Schedule.** Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML0735/ML073510265.pdf> (Acesso em 06/06/2024)

Yan, Jiafu et al. **Application of BIM Technology in Nuclear Power Construction Schedule Management**, PBNC 2022, p. 193-200, 2023. – Proceedings of the 23rd Pacific Basin Nuclear Conference, Volume 1. Beijing & Chengdu, China: Springer, 2023.

YASSER, Mamdoh et al. **Integrated model for BIM and risk data in construction projects.** *Engineering Research Express*, v. 4, n. 4, p. 045044, 2023.



## ANEXO A1 – Fatores de ganho devido a modularização métodos avançados e BIM

ASPECTO	Tempo de Construção	Custo
Método BIM	O fator utilizado para definição do FOAK e NOAK foi de 10%. (Yan, 2023).	Redução de custos através da diminuição de retrabalhos e otimização de processos.
Método Avançado (Cold Shrink)	O fator utilizado para cálculo da redução do cronograma foi de 12% nas atividades correspondentes, de acordo com o (NOVAES et al ,2024).	Redução de custo significativa devido à velocidade e segurança aumentadas.
Formas de Aço para Concretagem	O fator utilizado para cálculo da redução do cronograma foi de 21,31% nas atividades correspondentes, de acordo com o (NOVAES et al ,2024).	Redução de custo ao acelerar o processo de construção.
Modularização com Pré-Fabricação	O fator utilizado para cálculo da redução do cronograma foi de 50% nas atividades correspondentes, de acordo com o (NOVAES et al ,2024).	Redução de custo devido à eficiência aumentada e à realização de grande parte do trabalho em fábrica.
Instalação de Topo Aberto	Economias de tempo na instalação de equipamentos.	Potencial redução de custo através da facilidade de acesso e manutenção, e flexibilidade para modificações futuras.

## ANEXO A2 – Fator de escala de tempo utilizado para a estimação de tempos das atividades de construção de Aureum 1, adaptado de (Lloyd, 2019).

Prédio, equipamento	Fator de escala, n
Estrutura e melhoras	0,59
Equipamentos do reator e gerador de vapor	0,53
Equipamentos do turbogerador	0,83
Equipamentos elétricos	0,49
Equipamentos miscelâneas	0,59
Sistema principal de troca de calor	1,06

## ANEXO A3 – Fator de ajuste de custo do valor planejado baseado nos custos de capital reportados por (OECD, 2020).

Usina	País	Nome	OCC estimado	OCC real	Porcentagem do valor incrementado
AP1000	China	Sanmen 1, 2	2044	3154	54,3%
APR 1400	Coreia	Shin Kori 3,4	1828	2410	31,8%
EPR	China	Taishan 1,2	1960	3222	64,4%
		Média	1944	2900	48,0%