

## GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

### UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE LONGO PRAZO CONSIDERANDO EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

THATIANA CONCEIÇÃO JUSTINO(1); ALBERT CORDEIRO GEBER DE MELO(2);  
NELSON MACULAN FILHO(3)

CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (1);

UERJ - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (2);

COPPE/UFRJ – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (3)

#### RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia geral para o planejamento da expansão da geração de longo prazo (PEGLP) que representa de forma explícita as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na tomada de decisão com o objetivo de promover ações para a mitigação das mudanças climáticas. A metodologia proposta é baseada em métodos de apoio à decisão multicritério e emprega ainda técnicas de análise de envoltória de dados e de agrupamento estatístico. Os resultados da sua aplicação evidenciaram a sua capacidade de auxiliar o PEGLP considerando emissões de GEE e a sua relevância em termos de política energética.

#### PALAVRAS-CHAVE

Planejamento da expansão; Mudanças climáticas; Emissão de gases de efeito estufa; Métodos multicritério.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, em todo o mundo, tem havido uma preocupação cada vez crescente com o aquecimento global - ou *mudanças climáticas*, e com os impactos do aumento dos níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEEs) de origem antropogênica nos sistemas climáticos.

Neste sentido, diversos países têm se comprometido com metas para a mitigação das mudanças climáticas. Um exemplo é o estabelecimento do Acordo de Paris, em 2015, que visa limitar o aumento da temperatura da Terra em até 1,5°C até 2100. No âmbito deste acordo, cada país participante declarou a sua “pretendida” Contribuição Nacionalmente Determinada (*intended Nationally Determined Contribution* – iNDC) para alcançar o referido objetivo, com foco em tecnologias de baixo carbono e renováveis.

Considerando que os benefícios das ações de mitigação das emissões de GEE estão intimamente ligados a estratégias de longo prazo, i.e., com o planejamento da expansão, notadamente do sistema de geração, seria interessante que as metodologias e os modelos para o planejamento de longo prazo da expansão de sistemas elétricos passem a ser promotores de ações para a mitigação das mudanças climáticas como, por exemplo, das iNDCs dos países participantes do Acordo de Paris. Isto deve ocorrer, principalmente, em países em desenvolvimento, onde haverá crescimento do consumo de energia elétrica e aumento da capacidade instalada de geração e transmissão.

A metodologia usualmente empregada, inclusive no Brasil, para o planejamento da expansão de geração busca determinar uma estratégia de expansão e/ou um cronograma de obras que atenda o consumo de energia elétrica previsto para o horizonte de estudo, minimizando o custo de investimento mais o custo de operação, respeitando determinados níveis de segurança e considerando ainda aspectos socioambientais; constitui-se, portanto, em um problema de planejamento da expansão mono-objetivo. Embora os procedimentos empregados no processo de planejamento sejam aderentes para o propósito para o qual foram concebidos e, muitas vezes utilizem modelos computacionais sofisticados baseados em programação matemática e programação estocástica, a partir dos compromissos assumidos no Acordo de Paris, inclusive pelo Brasil, carecem da incorporação, de forma sistemática, no processo de tomada de decisão, da questão da mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Trata-se, em última análise, de um novo paradigma para o planejamento da expansão: a busca de uma solução de compromisso entre esses múltiplos objetivos. Para isso, faz-se necessário o desenvolvimento de modelos apropriados e o emprego de técnicas de apoio à decisão multicritério (1) torna-se altamente relevante.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia geral, baseada em técnicas de apoio à decisão multicritério, para resolver o problema de planejamento de longo prazo da expansão do sistema de geração de

energia elétrica de grande porte, que considere explicitamente a mitigação das mudanças climáticas na tomada de decisão, bem como outros objetivos, e.g., segurança energética e econômico (2),(3).

A abordagem desenvolvida também é flexível e multidisciplinar, sendo baseada em métodos de apoio à decisão multicritério, empregando ainda técnicas de análise de envoltória de dados e de agrupamento estatístico, otimização inteira e otimização estocástica.

A metodologia proposta foi aplicada a uma configuração real do sistema interligado brasileiro, de grande porte. Os resultados evidenciaram sua capacidade de auxiliar o planejamento da expansão da geração de longo prazo (PEGLP) considerando emissões de GEEs e sua relevância para a política energética.

## 2.0 - O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO

Usualmente, o problema de planejamento da expansão da geração é modelado como um problema com um único objetivo: determinar uma estratégia de expansão e/ou um cronograma de obras que atenda o consumo de energia elétrica previsto ao longo do horizonte de planejamento, minimizando o custo de investimento mais o custo de operação e ainda respeitando determinados níveis de segurança (4),(5) e, mais recentemente, considerando aspectos de desenvolvimento sustentável (6).

Este também é o caso do Brasil, onde o planejamento da expansão da geração busca minimizar os custos de investimento (de novas capacidades de geração e de interligação entre os subsistemas) mais o valor esperado do custo de operação, atendendo aos requisitos de segurança energética definidos pelo Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, incorporando ainda a dimensão ambiental nas diversas etapas do processo de planejamento.

As características particulares do sistema elétrico brasileiro - de grande porte, com um parque gerador com preponderância hidrelétrica, potencial hidrelétrico remanescente ainda relevante, envolvendo intercâmbios de grandes blocos de energia entre as diversas regiões do país para capturar os ganhos sinérgicos devido à diversidade hidrológica, taxas de crescimento do consumo de energia elevadas no longo prazo, política energética que prioriza as fontes renováveis de energia, com expectativa de elevada penetração das renováveis intermitentes (eólica e solar) - exigem que o planejamento da expansão do sistema elétrico seja feito com base em estudos com horizontes de longo prazo. Para tais estudos, no Brasil, pode-se adotar, e.g., o modelo MELP – Modelo de Expansão de Longo Prazo (7), desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

A estratégia de expansão determinada nos estudos de longo prazo é refinada na etapa de planejamento de curto prazo da expansão (horizonte de 10 anos), produzindo o plano decenal de expansão, com desagregação anual, e um programa de obras de referência, que visa à implantação de novos projetos de geração e transmissão, por meio de leilões públicos. Nesta etapa, adota-se o modelo NEWAVE – Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazos (8),(9), também desenvolvido pelo CEPEL.

As seções 2.1 e 2.2 apresentam uma breve descrição dos modelos MELP e NEWAVE, respectivamente.

### 2.1 Modelo da Expansão de Longo Prazo – MELP

No modelo MELP (7), o problema do planejamento da expansão da geração é caracterizado pela existência de dois subproblemas acoplados: subproblema de investimento e um subproblema de operação. O subproblema de investimento é um problema de programa inteira mista com múltiplos estágios que propõe uma estratégia de expansão para todo o período de planejamento a ser avaliada pelo subproblema de operação que, por sua vez, é formulado como um problema contínuo (linear).

O subproblema de investimento é definido principalmente pelos custos de investimento de usinas hidrelétricas, térmicas e troncos de interligação. O subproblema de operação está relacionado com os custos de combustíveis das usinas térmicas, manutenção de usinas (hidrelétricas e térmicas) e custos de déficits. No MELP, a operação do sistema é analisada para cada estágio de tempo do horizonte de planejamento considerando até dez cenários hidrológicos, incluindo necessariamente uma condição de hidrologia crítica para avaliar a confiabilidade do sistema, e as outras condições hidrológicas são usadas para avaliar as condições da operação econômicas do sistema. A representação simplificada do problema de operação permite a solução direta com base em algoritmos de Branch-and-Cut ou Branch-and-Price.

### 2.2 Modelo de Planejamento da Operação de Longo e Médio Prazos – NEWAVE

No modelo NEWAVE (8),(9), o problema de planejamento da operação é representado como um problema de programação linear estocástico multi-estágio. Sua função objetivo é minimizar o valor esperado do custo total de operação ao longo de todo o período de planejamento considerando mecanismos de aversão a risco, dado um estado inicial do sistema (armazenamento e tendência hidrológica). Custos de combustível das usinas termoeletricas e penalidades para o não atendimento ao mercado consumidor compõem o custo de operação. A solução deste problema resulta em uma estratégia operativa que, para cada estágio do período de planejamento, dado o estado inicial do sistema no estágio, produz metas de geração de energia e de intercâmbios entre subsistemas. No NEWAVE, os vários reservatórios do sistema podem ser agregados em reservatórios equivalentes de energia ou representados por meio de uma modelagem híbrida, permitindo que o modelo NEWAVE represente as usinas hidroelétricas individualmente, em todo ou em parte do seu horizonte de planejamento (10),(11). Por sua

vez, o estado do sistema inclui a energia armazenada dos reservatórios equivalentes e informações da "tendência hidrológica", por exemplo, as últimas  $p$  energias naturais afluentes de cada reservatório, individual ou equivalente.

Para resolver o problema de programação linear estocástico multi-estágio, o NEWAVE utiliza o algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) (12),(13). Após o cálculo da estratégia de operação, é realizada uma simulação final adotando outros 2000 cenários hidrológicos, sendo calculados diversos indicadores de desempenho do sistema.

### 3.0 - MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

Os métodos de Apoio à Decisão MultiCritério (ADMC) foram desenvolvidos para auxiliar a tomada de decisão em problemas com múltiplos objetivos (ou critérios), e podem ser utilizados para resolver problemas de escolha, classificação, ordenação ou descrição.

Para resolver qualquer tipo de problema (ou problemática) é preciso sintetizar as informações sobre os desempenhos das alternativas a partir de um procedimento de agregação. Considerando que esta agregação é realizada por meio de um procedimento matemático explícito, os métodos multicritério são classificados em dois grupos: (i) baseados em um critério de síntese, que permitem a compensação entre os critérios, i.e., os pesos geralmente atribuídos aos critérios para expressar a preferência do decisor podem ser considerados como taxas de substituição; e (ii) baseados em relações de sobreclassificação (i.e, prevalência, subordinação ou superação) que não são compensatórios, pois os pesos associados aos critérios têm sentido de poder voto para contribuir com a maioria que está a favor de uma sobreclassificação, e não podem ser considerados como taxas de substituição (1).

Na referência (2), alguns métodos ADMC foram utilizados para resolver o problema de PEGLP. No entanto, no estudo de caso realizado neste trabalho, foi suposto que a estrutura do decisor admite compensação entre os critérios, e optou-se por somente apresentar os resultados obtidos com a utilização dos métodos VIP Analysis (*Variable Interdependent Parameters Analysis*) (14) e FITradeoff (*Flexible and Interactive Tradeoff*) (15). Estes métodos são baseados em um modelo aditivo de funções de valores (ou de utilidade) (16) no qual os "pesos" dos critérios, na verdade, são constantes de escala que indiretamente representam a importância dos critérios.

No processo de decisão, geralmente, a elicitação das constantes de escala é um procedimento difícil e o decisor não é capaz ou não deseja realizar esta etapa. Neste sentido, para representar os parâmetros de importância dos critérios, estes métodos trabalham com informação incompleta ou parcial sobre as constantes de escala, i.e., as informações sobre estes parâmetros são apresentadas através de intervalos e restrições lineares (14). É possível, por exemplo, indicar que uma constante de escala é maior que outra ou apresentar uma ordem completa destes parâmetros. A partir das informações fornecidas, estes métodos usam programação linear para determinar os valores das constantes de escala que satisfazem todas as restrições estabelecidas. Vale ressaltar que a elicitação das constantes de escala é realizada pelo VIP Analysis sem um procedimento formal. Por outro lado, o FITradeoff utiliza um processo estruturado baseado no procedimento tradicional de Tradeoff (16).

Os principais resultados apresentados pelo VIP Analysis são: (i) intervalo composto pelos valores mínimo e máximo globais que cada alternativa pode assumir; (ii) para cada par de alternativas, a maior diferença entre os seus valores globais; e (iii) para cada alternativa, o máximo arrependimento associado com a escolha da alternativa.

Por sua vez, o FITradeoff, para a problemática de ordenação, fornece a ordenação das alternativas, porém, sem fornecer os seus valores globais que são considerados desnecessários, o que é uma das grandes vantagens dessa linha de métodos, visto que estudos comportamentais já mostraram, exaustivamente, o aumento da probabilidade de inconsistências quando se tenta obter informação precisa do decisor (15). Adicionalmente, ele também fornece os intervalos compostos pelos valores mínimo e máximo das constantes de escala.

### 4.0 - METODOLOGIA PROPOSTA PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE LONGO PRAZO CONSIDERANDO EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA BASEADA EM MÉTODOS ADMC

Embora os procedimentos empregados no processo de planejamento sejam aderentes ao propósito para o qual foram concebidos e, muitas vezes utilizem modelos computacionais sofisticados (alguns baseados em programação matemática e programação estocástica), há a necessidade da incorporação, de forma sistemática da questão da mitigação dos efeitos das mudanças climáticas no processo de tomada de decisão.

No entanto, o PEGLP não deve se limitar ao objetivo da mitigação das mudanças climáticas (e.g., emissões de GEE), mas deve harmonizá-lo com outros objetivos (e.g., econômico, de segurança energética e socioambiental). Isso implica na obtenção de planos de expansão da geração que permitam alcançar um equilíbrio entre esses vários objetivos, implicando na necessidade de desenvolvimento de modelos de planejamento da expansão de geração baseados em métodos de Apoio à Decisão com Múltiplos Critérios (1). Para tal, o PEGLP é modelado aqui como um problema com múltiplos objetivos (ou critérios) de tal forma que diversos objetivos sejam representados de forma explícita na solução do problema. O núcleo da abordagem proposta para resolver o problema PEGLP possui quatro etapas principais: (i) a formulação de alternativas de planos de expansão da geração (e de troncos de interligação entre os subsistemas); (ii) avaliação do desempenho destas alternativas em relação aos objetivos (ou critérios) adotados; (iii) pré-seleção das alternativas que irão para a etapa posterior; e (iv) a realização de uma análise multicritério para selecionar as "melhores" alternativas de plano de expansão de acordo com as preferências do decisor (3).

Devido às características do problema de decisão em tela, é interessante que o sistema de ADMC forneça não apenas “a melhor” alternativa segundo os critérios e preferências utilizados, mas a ordenação das alternativas segundo os seus desempenhos globais; trata-se, portanto, da *problemática de ordenação*. Adicionalmente, também é proveitoso do ponto de vista pragmático, quando da utilização dos métodos baseados em um critério de síntese, que se realize um agrupamento das alternativas em relação aos seus desempenhos globais, colocando em um mesmo grupo aquelas que são equivalentes (indiferentes).

Esta abordagem é geral e flexível, podendo ainda ser aplicada a qualquer tipo de sistema ou circunstância do país. Ademais, sua aplicação prática pode, em cada etapa, tirar proveito de modelos especializados que reconhecem características ou procedimentos específicos do sistema que está sendo analisado, bem como da estrutura e modelagem de preferências consideradas. Neste sentido, no caso do sistema interligado brasileiro, as duas primeiras etapas são realizadas a partir da utilização integrada de modelos especializados de planejamento da expansão e da operação do sistema de geração, e.g., os modelos MELP (7) ou MDI (17) na etapa de formulação das alternativas de planos de expansão, e o NEWAVE (8),(9) para a avaliação dos desempenhos.

Após a definição do conjunto final de alternativas e de posse dos seus respectivos desempenhos, realiza-se uma *análise multicritério* a fim de determinar qual será a alternativa preferida ou a ordenação das alternativas em relação ao seu desempenho global, de acordo com as preferências do decisor. Para tal, deve-se identificar a estrutura de preferências do decisor e, posteriormente, escolher o método multicritério a ser usado na análise.

A metodologia proposta foi implementada no sistema computacional denominado de SADPLANE (**S**istema de **A**poio à **D**ecisão **M**ulticritério para o **PL**anejamento da **E**xpansão da Geração de Longo Prazo considerando **E**missões de Gases de Efeito **E**stufa) (2). Visando incorporar maior robustez à tomada de decisão, foi implementado um conjunto de métodos multicritério, que variam na conformação da modelagem do problema de decisão, inclusive quanto à maneira de realizar a agregação dos desempenhos – compensatória (usando um critério de síntese) ou não compensatória (usando relações de sobreclassificação). Este aspecto está relacionado com o raciocínio de que, quando o decisor é informado por diversos arcabouços, logicamente consistentes e validados empiricamente, é mais provável que ele exerça escolhas sensatas. No entanto, neste trabalho foi suposto que a estrutura do decisor admite compensação entre os critérios, e optou-se por utilizar os métodos VIP Analysis (14) e FITradeoff (15).

As seções 4.1. a 4.4 apresentam, respectivamente, uma breve descrição das etapas de formulação, avaliação, pré-seleção e agrupamento das alternativas de planos de expansão da geração.

#### 4.1 Formulação de Alternativas de Planos de Expansão da Geração

Realizada através da inserção de restrições, no problema resolvido pelo MELP, que refletem, por exemplo, possíveis cenários de mitigação de gases de efeito estufa a partir do aumento da participação de fontes renováveis na matriz elétrica. Por exemplo, no caso da INDC brasileira, existe uma meta de expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hidroelétrica) na matriz de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação das tecnologias eólica, biomassa e solar.

#### 4.2 Avaliação do Desempenho das Alternativas

Após o cálculo da política de operação, o modelo NEWAVE realiza uma simulação final a fim de avaliar o desempenho do sistema na presença de cenários hidrológicos diferentes daqueles adotados no cálculo da política. Para tanto, são considerados outros 2000 cenários hidrológicos multivariados. A partir dos resultados da simulação final são produzidas estatísticas (valores esperados, desvio padrão, distribuições de frequências, etc) associadas a diversos indicadores de desempenho do sistema, entre os quais, custo total de operação, custo marginal de operação, risco de déficit, déficit de energia, geração hidrelétrica e termelétrica, vertimentos, etc. Estes indicadores podem ser utilizados para construir os critérios da análise proposta neste trabalho.

Na abordagem proposta, o objetivo econômico será representado pelo critério *custo total* de expansão calculado a partir da soma do custo de investimento obtido pelo modelo MELP e do valor esperado do custo de operação obtido pelo modelo NEWAVE; o *risco médio de déficit* de energia será o critério que representará o objetivo de segurança energética; e o critério *emissões de GEE* (18), e.g. no último ano de planejamento, caso ele coincida com as metas da INDC brasileira, representará o objetivo de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas; sendo os dois últimos critérios também calculados pelo NEWAVE. Neste trabalho, os objetivos socioambientais não foram diretamente considerados, embora possam ser abrigados na metodologia proposta.

#### 4.3 Pré-seleção das Alternativas para a Etapa de Análise Multicritério

Tem o objetivo de identificar o conjunto final de alternativas, que devem ser consideradas na etapa de análise multicritério, excluindo, por exemplo, alternativas que não sejam eficientes ou estejam distantes da fronteira de eficiência. Esta etapa é particularmente importante nos métodos de um critério de síntese quando o número de alternativas ou a variabilidade de desempenhos entre elas possa dificultar a elicitação dos pesos (ou constantes de escala) dos critérios. Para tanto, foi utilizada a técnica de Análise Envolvente de Dados – DEA (*Data Envelopment*

Analysis) (19) com o modelo clássico de DEA que admite uma função fronteira com rendimentos constantes de escala (*Constant Return to Scale - CRS*).

#### 4.4 Agrupamento das Alternativas em relação aos seus Desempenhos Globais usando Técnicas Estatísticas

Realizado com o objetivo de identificar, ao final da ordenação das alternativas, aquelas que sejam equivalentes (ou indiferentes) entre si. Isto pode ser feito pelo emprego de uma tolerância (limiar de indiferença) para se comparar os valores finais da métrica utilizada. Outra possibilidade, mais eficiente principalmente quando o número de alternativas é elevado, é a utilização de técnicas estatísticas de análise de agrupamentos. Neste trabalho foi utilizado um algoritmo hierárquico aglomerativo – o método de Ward (20). Adicionalmente, a definição do número adequado de agrupamentos foi realizada por meio de métricas para se aferir o desempenho da agregação, como o dendrograma do processo de agrupamento e o percentual da inércia entre as classes na inércia total dos dados.

#### 5.0 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA AO SISTEMA DE GERAÇÃO BRASILEIRO

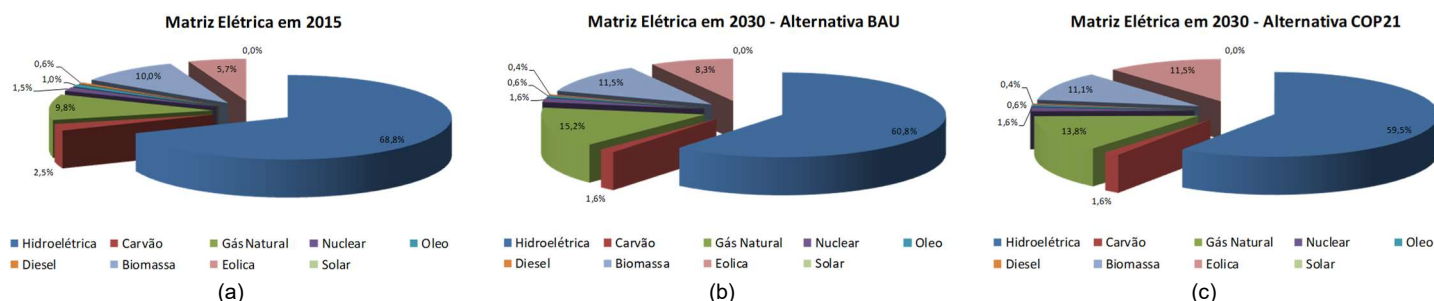
O caso utilizado neste trabalho é baseado em uma configuração real do Sistema Interligado Nacional (SIN) obtida do Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE (21). Embora, o ano meta para os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris seja 2025, a INDC brasileira também informou contribuições indicativas subsequentes, incluindo o setor elétrico, a serem alcançadas em 2030; assim, este ano foi adotado como último ano (horizonte) do período de planejamento no estudo de caso. Como consequência, o período de planejamento considerado foi 2016 a 2030, para o qual foi formulado um conjunto de alternativas de planos de expansão da geração (e troncos de interligação). Os custos de implantação dos projetos candidatos (usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas e solares PV e troncos de interligações) foram obtidos do relatório (22).

#### 5.1 Formulação de Alternativas de Planos de Expansão da Geração

As alternativas de plano de expansão da geração para o período de planejamento 2016 a 2030 foram obtidas através de simulações com o modelo MELP. A primeira alternativa (BAU) foi obtida usando o procedimento de planejamento atual e corresponde ao caso *business as usual*. Adicionalmente, foram formuladas quatorze alternativas de planos de expansão, através da inserção, no modelo MELP, de restrições associadas a políticas energéticas específicas, tais como as INDCs brasileiras, e suas implicações na matriz elétrica brasileira em 2030.

Para facilitar a análise posterior, associou-se a cada uma destas alternativas um código mnemônico, conforme descrito a seguir: (i) BAU: *business as usual*; (ii) COP21: capacidade de biomassa + eólica + solar  $\geq 23\%$  da capacidade instalada total (CT) do sistema; (iii) 84(H\_COP21): capacidade de hidrelétrica + biomassa + eólica + solar  $\geq 84\%$ CT; (iv) 30NRen: capacidade de biomassa + eólica + solar  $\geq 30\%$ CT; (v) 40NRen: capacidade de biomassa + eólica + solar  $\geq 40\%$ CT; (vi) 12B\_8E\_3S: {biomassa  $\geq 12\%$ CT, eólicas  $\geq 8\%$ CT e solar  $\geq 3\%$ CT}, simultaneamente; (vii) N6: capacidade instalada de usinas nucleares  $\geq 6,000$  MW; (viii) N8: capacidade instalada de usinas nucleares  $\geq 8,000$  MW; (ix) COP21\_N8: considera simultaneamente as restrições das alternativas COP21 e N8; (x) 12B\_8E\_3S\_N8: considera simultaneamente as restrições das alternativas 12B\_8E\_3S e N8; (xi) 84(H\_12B\_8E\_3S): considera simultaneamente as restrições das alternativas 84(H\_COP21) e 12B\_8E\_3S; (xii) 50H: capacidade de hidrelétrica  $\leq 50\%$ CT; (xiii) 45H: capacidade de hidrelétrica  $\leq 45\%$ CT; (xiv) 40H: capacidade de hidrelétrica  $\leq 40\%$ CT; (xv) 30H: capacidade de hidrelétrica  $\leq 30\%$ CT.

A matriz elétrica em 2015, em termos da capacidade instalada (%), é exibida na Figura 1(a), e nas Figuras 1(b) a 1(f) são ilustradas as participações das fontes de energia obtidas, para o ano de 2030, para algumas alternativas de expansão, i.e., BAU, COP21, 84(H\_12B\_8E\_3S) e 40NRen e 30H, respectivamente. Nota-se que o aumento da participação das fontes biomassa, eólica e solar em relação ao cenário BAU foi compensado, na maior parte, pela redução na participação de usinas hidrelétricas e de térmicas a gás natural. Observa-se também que houve redução na participação de usinas térmicas a carvão, óleo e nucleares, porém, em menor escala.



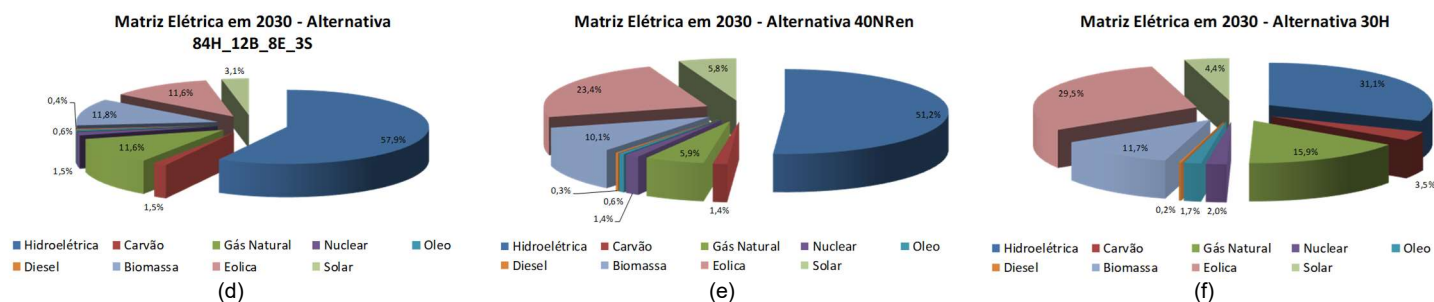


FIGURA 1 – Composição da matriz elétrica obtida para algumas alternativas de expansão.

Vale ressaltar que na maioria das alternativas houve um aumento significativo na participação das eólicas, o que corrobora a competitividade econômica e a maturidade comercial desta fonte. Por outro lado, considerando os dados utilizados, a geração solar ainda não é competitiva frente às demais fontes, só expandindo nas alternativas em que se pré-definiu um percentual de participação desta fonte (alternativas 12B\_8E\_3S, 12B\_8E\_3S\_N8 e 84(H\_12B\_8E\_3S)), ou quando a política energética requeria um grande percentual das fontes biomassa, eólica e solar (alternativa 40NRen), ou quando há uma grande redução de usinas hidrelétricas (alternativas 50H, 45H, 40H e 30H). Nota-se ainda que as alternativas 50H, 45H, 40H e 30H, representam políticas energéticas que resultam em planos com reduções aceleradas e até mesmo, do ponto de vista pragmático, de abandono da expansão de usinas hidrelétricas. Por exemplo, comparando com o ano-base (2015), seriam acrescentados 24.000, 17.000, 8.000 e 5.000 MW de capacidade de hidrelétricas, respectivamente, frente ao acréscimo 37.000 na alternativa BAU. Como consequência, além do aumento dos custos, há um aumento significativamente elevado de usinas eólicas, além de um aumento na participação de fontes mais poluentes como o gás natural e até de usinas termelétricas a carvão, a fim de manter a confiabilidade do sistema.

## 5.2 Avaliação do Desempenho das Alternativas de Planos de Expansão

As alternativas elaboradas na etapa de formulação foram avaliadas a partir da simulação com o modelo NEWAVE, em termos dos seguintes critérios: custo total de expansão calculado a partir da soma do custo de investimento obtido pelo modelo MELP e do valor esperado do custo de operação calculado pelo modelo NEWAVE; risco de déficit de energia do subsistema Sudeste/Centro-Oeste (designado apenas por Sudeste); e emissões de GEE em 2030, também proveniente do NEWAVE. Todos os parâmetros, exceto o custo de investimento, foram obtidos pelo NEWAVE, tendo-se introduzido neste modelo o cálculo de emissões de ciclo de vida de GEE por tecnologia de geração de energia ( $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$ ) (23). Para este estudo, utilizou-se o risco de déficit do Sudeste por ser o subsistema com maior demanda de energia e maiores capacidade de geração e armazenamento, tendo assim preponderância na determinação do risco do SIN.

Para cada critério, a Tabela 1 apresenta os desempenhos das alternativas que foram utilizados na etapa de análise multicritério e a eficiência usada na etapa de pré-seleção (seção 5.3). Nesta tabela, os melhores e os piores desempenhos das alternativas, em cada critério, estão assinalados em verde e vermelho, respectivamente. Verifica-se que os valores dos desempenhos das alternativas estão coerentes com as suas respectivas composições da matriz elétricas do SIN. Por exemplo, a alternativa BAU, que possui uma das menores participações das usinas com tecnologia biomassa, eólica e solar, apresenta o menor custo total de expansão; por outro lado, esta alternativa corresponde ao maior valor de emissões de GEE devido ao grande percentual de usinas termelétricas a gás natural.

Tabela 1 – Resultados da avaliação do desempenho e de eficiência das alternativas de plano de expansão

Alternativa	Valor esperado do custo total ( $10^6$ R\$)	Risco de déficit do Sudeste (%)	Emissões de GEE em 2030 ( $\text{Mton CO}_2\text{eq.}$ )	Eficiência
BAU	404.504,91	1,78	106,04	100%
CO21	407.151,96	1,59	94,82	100%
84(H_COP21)	424.225,83	1,57	84,92	100%
30NRen	438.816,36	1,64	70,30	100%
40NRen	491.674,60	2,01	49,81	100%
12B_8E_3S	410.048,60	1,57	98,85	99%
N6	409.939,19	1,45	103,79	100%
N8	423.266,05	1,45	101,26	100%
COP21_N8	444.829,71	1,69	81,85	96%
12B_8E_3S_N8	436.264,37	1,57	82,36	100%
84(H_12B_8E_3S)	419.977,12	1,56	85,44	100%
50H	444.494,95	1,87	76,41	98%
45H	466.867,19	1,92	75,22	94%
40H	490.842,91	1,96	72,84	91%
30H	679.878,65	3,43	88,13	68%



### 5.3 Pré-seleção das Alternativas para a Etapa de Análise Multicritério

Nesta etapa, o modelo de análise de envoltória de dados (DEA) foi aplicado ao conjunto de alternativas, onde o vetor de insumos de cada alternativa é constituído pelos critérios custo total, risco de déficit e emissões de GEE apresentados na Tabela 1, e o vetor de quantidades de produtos assume o valor unitário para todas as alternativas. A eficiência de cada alternativa também é apresentada na Tabela 1.

Como o objetivo da etapa de pré-seleção é manter o maior número possível de alternativas, eliminando apenas aquelas que estejam distantes da fronteira de eficiência, i.e., que possam acarretar em uma incapacidade dos métodos ADMC em distinguir as demais alternativas entre si (indiferença), verifica-se que adoção do limiar de 90% atende este objetivo. Assim, adotando o limiar de corte igual a 90%, a alternativa 30H é, então, descartada, pois a sua eficiência é de 68%.

### 5.4 Análise Multicritério para o Planejamento da Expansão da Geração

Esta análise foi realizada através dos métodos VIP Analysis e FITradeoff. A fim de verificar o desempenho da metodologia proposta para diferentes cenários de preferência, a análise multicritério foi realizada sob o ponto de vista de quatro tipos de decisores, conforme listado a seguir: (i) decisor que não tem preferência entre os critérios, i.e., *neutro* - Decisor DN; (ii) decisor que considera que o critério *custo total* tem preferência sobre os demais - Decisor DC; (iii) decisor que considera que o critério *risco de déficit* tem preferência sobre os demais - Decisor DR; (iv) decisor que considera que o critério *emissões de GEE* tem preferência sobre os demais - Decisor DE.

Como apresentado na seção 3.0, o VIP Analysis produz várias informações sobre o conjunto de alternativas que podem ser usadas na análise multicritério. Neste trabalho, o valor do máximo arrependimento (MaxArrep) na escolha de uma determinada alternativa foi adotado como o desempenho global das alternativas, e ordenação das alternativas foi obtida a partir desta métrica. Já o FITradeoff provê a ordenação sem fornecer o desempenho global das alternativas por se tratar de um método que trabalha com informação incompleta ou parcial.

Para o Decisor DN, a ordenação das alternativas e os seus respectivos desempenhos globais são apresentados na Tabela 2. Os métodos VIP Analysis e FITradeoff indicaram como alternativa preferida a 84(H\_12B\_8E\_3S) que corresponde à forma mais ampla da INDC brasileira na COP 21, pois discrimina os 23% da participação das fontes biomassa, eólica e solar e ainda coloca uma participação mínima da fonte hidrelétrica. Adicionalmente, as ordenações das alternativas obtidas pelos dois métodos são iguais, uma vez que os valores das constantes de escala dos critérios podem ser calculados de forma exata para este cenário.

A ordenação das alternativas obtida para o Decisor DC é apresentada também na Tabela 2. Observa-se que os dois métodos apontaram como alternativa preferida a COP21, seguida da N6, e como menos preferidas as alternativas de redução elevada da expansão das fontes hidrelétricas; e também que as ordenações determinadas pelos dois métodos são semelhantes. Considerando os agrupamentos encontrados, as três primeiras alternativas são equivalentes e pertencem à primeira classe; ainda, o método VIP Analysis considerou as alternativas 84(H\_COP21) e N8 como indiferentes, e o FITradeoff as considerou como incomparáveis. O mesmo foi observado para as alternativas BAU e 84(H\_12B\_8E\_3S).

Tabela 2 – Ordenação das alternativas para os Decisores DN e DC

Decisor DN			Decisor DC		
Ordenação pelo VIP Analysis		Ordenação pelo FITradeoff	Ordenação pelo VIP Analysis		Ordenação pelo FITradeoff
Alternativas	Max Arrep.		Alternativas	Max Arrep.	
84(H_12B_8E_3S)	-0,005	84(H_12B_8E_3S)	CO21	0,024	COP21
N6	0,005	N6	N6	0,025	N6
84(H_COP21)	0,019	84(H_COP21)	12B_8E_3S	0,047	12B_8E_3S
CO21	0,024	COP21	84(H_12B_8E_3S)	0,122	BAU
30NRen	0,03	30NRen	N8	0,16	84(H_12B_8E_3S)
N8	0,041	N8	84(H_COP21)	0,166	84(H_COP21)
12B_8E_3S	0,047	12B_8E_3S	BAU	0,194	N8
12B_8E_3S_N8	0,05	12B_8E_3S_N8	12B_8E_3S_N8	0,288	12B_8E_3S_N8
COP21_N8	0,151	COP21_N8	30NRen	0,31	30NRen
BAU	0,194	BAU	COP21_N8	0,387	COP21_N8
50H	0,225	50H	50H	0,395	50H
40NRen	0,331	40NRen	45H	0,629	45H
45H	0,333	45H	40NRen	0,871	40NRen
40H	0,434	40H	40H	0,878	40H

Para o cenário em que o risco de déficit tem preferência sobre os demais critérios (Decisor DR), notou-se que, da mesma forma que o caso do Decisor DC, as ordenações produzidas pelos dois métodos foram em geral semelhantes - vide Tabela 3. Os dois métodos apontaram que a alternativa N6 é a preferida para este cenário. Chama a atenção que no FITradeoff as alternativas COP21 e N8 foram consideradas incomparáveis, e para o VIP Analysis, elas se encontram em posições distintas (N8 está em segundo lugar e COP21 em sétimo).

Tabela 3 – Ordenação das alternativas para os Decisores DR e DE

Decisor DR			Decisor DE		
Ordenação pelo VIP Analysis		Ordenação pelo FITradeoff	Ordenação pelo VIP Analysis		Ordenação pelo FITradeoff
Alternativas	Max Arrep.		Alternativas	Max Arrep.	
N6	0,005	N6	30NRen	0,265	40NRen
N8	0,041	84(H_12B_8E_3S)	40NRen	0,331	30NRen
84(H_12B_8E_3S)	0,166	84(H_COP21)	45H	0,384	12B_8E_3S_N8
84(H_COP21)	0,184	COP21	50H	0,386	84(H_COP21)
		N8			84(H_12B_8E_3S)
12B_8E_3S	0,189	30NRen	40H	0,434	50H
12B_8E_3S_N8	0,189	12B_8E_3S	12B_8E_3S_N8	0,45	COP21_N8
CO21	0,215	12B_8E_3S_N8	COP21_N8	0,457	45H
30NRen	0,292	COP21_N8	84(H_COP21)	0,484	CO21
					40H
COP21_N8	0,386	BAU	84(H_12B_8E_3S)	0,489	12B_8E_3S
BAU	0,529	50H	CO21	0,634	N8
50H	0,67	45H	12B_8E_3S	0,699	N6
45H	0,763	40NRen	N8	0,734	BAU
40H	0,839	40H	N6	0,767	
40NRen	0,899		BAU	0,829	

Para o Decisor DE, cenário em que as emissões de GEE tem preferência sobre os demais, e considerando o agrupamento das alternativas, os métodos indicaram como alternativa preferida a 40NRen, que possui o menor montante de emissões de GEE, seguida da 30NRen - vide Tabela 3. Por outro lado, a alternativa BAU foi considerada a menos preferida. A ordenação obtida pelo FITradeoff coincide com a do VIP Analysis apenas nas últimas posições.

Por fim, para os cenários de preferência considerados não houve uma mesma alternativa que fosse preferida em todos os casos. Porém, exceto para o Decisor DE, e considerando as classes obtidas pela análise de agrupamento estatístico, os métodos coincidem em apontar que as alternativas que são variantes da INDC brasileira – que prioriza a expansão da hidroeletricidade e o aumento da participação das novas renováveis, tais como COP21, 84(H\_COP21), 84(H\_12B\_8E\_3S), N6 e 12B\_8E\_3S – são as mais robustas. Adicionalmente, nota-se que, em todos os cenários de preferência, exceto para o Decisor DE, as alternativas de redução elevada da expansão das fontes hidrelétricas ficaram nas últimas posições nos dois métodos.

### 5.5 Agrupamento das Alternativas

A partir dos desempenhos globais representados pelos máximos arrependimentos calculados pelo VIP Analysis, foi efetuada a análise de agrupamentos utilizando o método de Ward. Os números de classes para os Decisor DN, DC, DR e DE foram 3, 5, 4, e 4, respectivamente. Nas Tabelas 3 a 6, as cores azul e branco da primeira coluna refletem as alternativas constantes em cada grupo.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma metodologia geral, baseada em técnicas de apoio à decisão multicritério, para resolver o problema de planejamento da expansão do sistema de geração de energia elétrica de longo prazo, que considere explicitamente a mitigação das mudanças climáticas na tomada de decisão.

A metodologia proposta foi aplicada a uma configuração do SIN planejada para o ano 2024, a qual foi estendida para o ano 2030. Foram analisadas, sob a ótica de 4 cenários de preferências distintas, 14 alternativas de expansão formuladas, considerando 3 objetivos (ou critérios): mudanças climáticas (emissões de gases de efeito estufa), segurança energética (risco de déficit) e econômico (custos de investimento e de operação).

Notou-se que para os cenários de preferência considerados não houve uma alternativa que fosse preferida em todos os casos. Porém, exceto para o Decisor DE, e considerando as classes obtidas pela análise de agrupamento estatístico, os métodos coincidem em apontar que as alternativas que são variantes da INDC brasileira (que prioriza a expansão da hidroeletricidade e o aumento da participação das novas renováveis) são as mais robustas. Da mesma forma, as alternativas que representam políticas energéticas que resultam em planos de expansão com reduções aceleradas e até mesmo, do ponto de vista pragmático, de abandono da expansão de usinas hidrelétricas, ocupam as últimas posições nas ordenações das alternativas e devem, portanto, ser descartadas.

Os resultados obtidos apontam o potencial da metodologia proposta em auxiliar na escolha robusta dos “melhores” planos de expansão conforme as preferências do decisor, podendo, inclusive, ser um instrumento relevante para análises de políticas públicas em termos de expansão de energia elétrica, verificando os custos e os benefícios associados, antes de sua efetiva adoção. Os resultados também encorajam a continuação da pesquisa a fim de aprimorar a metodologia proposta por meio da consideração de outros objetivos e de outros métodos multicritérios.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (eds). Multicriteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, Boston, Springer Science + Business Media, Inc, 2005.



- (2) Justino, T. C. Um Sistema de Apoio à Decisão Multicritério para o Planejamento da Expansão da Geração de Longo Prazo Considerando Emissões de Gases de Efeito Estufa, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.
- (3) Justino, T. C., Melo, A. C. G., Maculan, N., Maceira, M. E. P. A Multicriteria Modelling to the Long Term Generation Expansion Planning considering Greenhouse Gas Emissions, 30th European Conference on Operational Research, Dublin, Ireland, 2019.
- (4) Munasinghe, M. A New Approach to Power System Planning, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 99, n. 3, pp. 1198-1206, 1980.
- (5) GCPS/ELETROBRÁS - Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos / Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Critérios e Procedimentos para o Planejamento da Expansão da Geração. Relatório Técnico, Dezembro de 1999.
- (6) Melo, A. C. G., Maceira, M. E. P., Zimmermann, M. P., Wojcicki, F. R. Sustainable Development of Hydropower in Brazil - Technical and Institutional Aspects, 44th Biannual CIGRÉ Session, Paris, France, 26-31 August 2012.
- (7) Lisboa, M. L. V., Melo, A. C. G., Maceira, M. E. P., Sabóia, C. H. M., Cattán, F. J., Sales, P. R. H., Daher, M. J., Sagastizábal, C. "MELP – Um Modelo de Planejamento da Expansão de Geração de Energia Elétrica de Longo Prazo", 5th Latin-America Congress: Electrical Generation and Transmission, São Pedro-SP, 2003.
- (8) Maceira, M. E. P., Melo, A. C. G., Zimmermann, M. P. "Application of Stochastic Programming and Probabilistic Analysis as Key Parameters for Real Decision Making regarding Implementing or Not Energy Rationing – A Case Study for the Brazilian Hydrothermal Interconnected System", 19th Power Systems Computation Conference - PSCC, Genoa, Italy, June 2016.
- (9) Maceira, M. E. P., Penna, D. D. J., Diniz A. L., Pinto, R. J., Melo, A. C. G., Vasconcellos, C. V., Cruz, C. B. "Twenty Years of Application of Stochastic Dual Dynamic Programming in Official and Agent Studies in Brazil - Main Features and Improvements on the NEWAVE Model". 20th Power System Computation Conference, Dublin, Ireland, 11-15 June 2018.
- (10) Maceira, M. E. P., Cruz, C. B., Penna, D. D. J., Diniz, A. L., Melo, A. C. G. Combined Representation of Hydropower Plants and Inflow Scenarios Re-Sampling on Stochastic Dual Dynamic Programming – Application to the Brazilian System. 15th International Conference on Stochastic Programming, Trondheim, Norway, 2019.
- (11) Maceira, M. E. P., Cruz, C. B., Penna, D. D. J., Diniz, A. L., Treistman, F., Melo, A. C. G., Justino, T. C. Representação de Usinas Hidrelétricas Individualmente e de Forma Agregada na Programação Dinâmica Dual Estocástica - A Abordagem Híbrida. XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 2019.
- (12) Pereira, M. V. F., Pinto, L. M. V. G. Multi Stage Stochastic Optimization Applied to Energy Planning, Mathematical Programming, v. 52, pp. 359-375, 1991.
- (13) Maceira, M. E. P. Programação Dinâmica Dual Estocástica Aplicada ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos com Representação do Processo Estocástico de Afluências por Modelos Auto-Regressivos Periódicos, Relatório Técnico CEPEL 237/93, Junho 1993.
- (14) Dias, L. C., Climaco, J. N. Additive aggregation with variable independent parameters: The VIP Analysis software. Journal of the Operational Research Society 2000; 51(9): 1070-1082. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601012.
- (15) De Almeida, A. T., Almeida, J. A., Costa, A. P. C. S., De Almeida-Filho, A. T. (2016). "A New Method for Elicitation of Criteria Weights in Additive Models: Flexible and Interactive Tradeoff". European Journal of Operational Research, v. 250, n. 1, pp. 179-191.
- (16) Keeney, R. L., Raiffa, H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. New York: John Wiley & Sons Inc; 1976.
- (17) Gandelman, D. A., Uma Metodologia para o Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico Brasileiro Considerando Incertezas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.
- (18) Justino, T.C., Melo, A.C.G., Maceira, M.E.P., Cruz, C., Maculan, N., "Representação de Medidas de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Problema do Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados", XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Belo Horizonte-MG, 2019.
- (19) Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units, European Journal of Operational Research, v. 2, p. 429-444, 1978.
- (20) Johnson, R.A., Wichern, D.W., "Applied Multivariate Analysis", Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- (21) MME - Ministério de Minas e Energia/EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Relatório Técnico, Dezembro de 2015.
- (22) EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Estudos para a Expansão: Custo Marginal da Expansão do Setor Elétrico Brasileiro – Metodologia e Cálculo. Relatório Técnico EPE-DEE-RE-55/2018 – r1, 2018.
- (23) Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2012), Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN).



Thatiana Conceição Justino é graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005), possui mestrado em Engenharia Elétrica (2009) e doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação (2020) ambos pela COPPE/UFRJ. Desde 2006 é pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), onde tem trabalhado no desenvolvimento de estudos e modelos computacionais associados aos planejamentos da expansão e da operação energéticos de longo e médio prazo, confiabilidade de sistemas de potência, análise de decisão multicritério e previsão de carga no curto prazo.



Albert Cordeiro Geber De Melo é Engenheiro Eletricista (UFPE-1983), Mestre (1986) e Doutor (1990) pela PUC-Rio. Professor Adjunto do Instituto de Matemática e Estatística da UERJ. Trabalhou como Pesquisador no CEPEL (1985-2020), onde exerceu vários cargos gerenciais, incluindo Diretor de P&D (Jan/2005-Jul/2008) e Diretor-Geral (Ago/2008–Jan/2017). Tem experiência na coordenação e desenvolvimento de projetos, metodologias e sistemas computacionais em energia elétrica. Representou o Brasil em diversos fóruns internacionais, incluindo ONU e Agência Internacional de Energia-IEA, onde foi Coordenador Técnico do Programa de Trabalho entre o Brasil e a IEA (2011-2016). É *Distinguished Member* do CIGRÉ, *Senior Member* do IEEE e Membro da Academia Nacional de Engenharia.



Nelson Maculan Engenheiro de Minas e Metalurgia pela Universidade Federal de Ouro Preto (1965), Mestrado (D.E.A.) Matemática Estatística - Sorbonne Université (1967), Doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1975) e Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches (H.D.R) en Sciences de la Gestion, Université Paris-Dauphine (1988). Atualmente é Professor Emérito da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Matemática da Computação, atuando principalmente nos seguintes temas: otimização combinatória, programação inteira, programação linear, geração de colunas e otimização global.