OptGen

Manual do usuário

VERSÃO 8.0

PSR

Índice

1 Notas sobre a instalação e manipulação de dados 4
1.1 Instalação 4
1.2 Espaço necessário para a instalação 4
2 Primeiros passos 5
2.1 Abrindo a interface gráfica do OptGen 5
2.2 Seleção de diretório 5
2.3 Criando um novo caso 5
3 Visão geral 6
3.1 Organização da interface 6
3.2 Como navegar 9
4 Dados de entrada 10
4.1 Cronogramas de desembolsos 10
4.2 Dados do projeto 10
4.3 Plano de expansão definido pelo usuário 22
4.4 Restrições de energia/potência firme 24
4.5 Restrições adicionais mínimas e máximas 28
4.6 Cenários de vazão 29
4.7 Calculadora de dia típico 30
5 Parâmetros do modelo 33
5.1 Opções de estudo 33
5.2 Seleções 36
5.3 Opções de execução 36
6 Módulo Graficador 42
6.1 Introdução 42
6.2 Opções gerais 42
6.3 Seleção de etapas 43
6.4 Seleção de blocos 43
6.5 Seleção de séries 43
6.6 Título dos eixos (opcional) 43
6.7 Seleção de variáveis, agentes e macro agentes 43

6.8 Filtros 44
7 Arquivos de saída do modelo 45
7.1 Arquivos de saída em planilhas 45
7.2 Arquivos de saída adicionais 46

1 NOTAS SOBRE A INSTALAÇÃO E MANIPULAÇÃO DE DADOS

1.1 Instalação

O usuário pode instalar o modelo OptGen por meio de download através do nosso site www.psr-inc.com. Nesta página, no menu localizado na parte superior, selecione “Software> OptGen”. Na página seguinte, a última versão disponível estará no menu da direita. Clique sobre o link e prossiga com o processo de instalação. O usuário também pode salvar o arquivo de instalação no computador para instalar mais tarde caso deseje.

Por favor, observe que o programa deve ser instalado usando privilégios de administrador para que todos os arquivos necessários sejam instalados corretamente.

No momento da instalação, uma senha será solicitada. Esta senha é enviada por e-mail aos usuários licenciados quando uma nova versão é lançada.

Os novos recursos e correções do modelo estão descritos no arquivo **Changelog**, que pode ser acessado a partir da interface gráfica do OptGen na opção “Ajuda> Lista de alterações detalhadas” do menu principal. Por favor, leia-o cuidadosamente antes de usar cada nova versão do modelo. Os manuais do usuário e metodologia do OptGen também podem ser encontrados na opção “Ajuda”.

Para executar o modelo, é necessária uma chave *hard lock* inserida em uma das portas USB. Esta chave é programada especificamente para cada usuário e enviada no momento da aquisição da licença.

1.2 Espaço necessário para a instalação

O OptGen requer 500 MB de espaço livre em disco para instalar o sistema. Observa-se que os resultados gerados pelo modelo podem ocupar bastante espaço em disco, dependendo das dimensões dos casos de estudo.

2 PRIMEIROS PASSOS

2.1 Abrindo a interface gráfica do OptGen

O modelo é inicializado com a abertura da interface gráfica do OptGen. Usando a plataforma Windows, o modelo OptGen pode ser executado a partir do desktop, selecionando o ícone OptGen, ou a partir do menu “Iniciar> Programas> PSR> OptGen”.

2.2 Seleção de diretório

Uma vez aberta a interface, o primeiro passo é escolher o diretório onde os dados de entrada estão localizados. Clique em “Procurar...” para buscar o diretório escolhido. Analogamente ao modelo SDDP, o OptGen também permite ao usuário manter, no mesmo diretório, dados para configurações diferentes de blocos de demanda. Por esta razão, nesta tela, o usuário precisa definir o número de blocos de demanda e o tipo de estágio (semanal ou mensal) a serem considerados.

2.3 Criando um novo caso

Caso não existam dados do OptGen no diretório selecionado, a interface cria automaticamente novos dados, considerando valores padrão para os parâmetros de execução.

3 VISÃO GERAL

3.1 Organização da interface

A interface modelo OptGen é dividida em duas seções principais: uma barra de ferramentas no menu principal e a tela principal.

3.1.1 Menu principal

No topo da tela, o usuário encontra o menu principal (barra de ferramentas) que contém os botões para acessar as telas de edição de dados, execução do modelo e visualização de saídas. Cada uma das opções apresenta uma série de opções secundárias que são apresentados a seguir (aqueles que não estão descritos aqui têm uma seção dedicada à sua explicação neste documento):

a) *Arquivo*
   - *Salvar* : Salva as alterações feitas nas opções da tela principal
   - *Diretório*: Seleciona um novo diretório de dados
   - *Compactar dados do caso*: gera um arquivo zip contendo todos os arquivos de dados de entrada OptGen-SDDP
   - *Sair*: Fecha a interface do modelo

b) *Editar*
   - SDDP: Em uma base de dados OptGen-SDDP, todos os dados de operação são gerenciados pelo modelo SDDP, esta opção permite ao usuário acessar diretamente a interface do SDDP e editar todos os dados operativos.
   - *Cronograma de desembolsos*
   - *Projetos*
   - *Plano de expansão definido pelo usuário*
   - *Restrição de energia firme*
   - *Restrição de potência firme*
   - *Restrições adicionais mínimas e máximas*
   - *Cenários de vazão*
   - *Calculadora de dia típico*

c) *Opções*
   - *Definir diretórios*: Permite que o usuário defina os diretórios de instalação do modelo SDDP e da aplicação MPI

d) *Executar*
   - *Otimização*: Executa otimização do planejamento da expansão
   - *Graficador*: Permite ao usuário acessar o *módulo graficador* para visualização de relatórios de saída.

e) *Relatórios*
   - *Relatório de execução*
   - *Plano de expansão ótimo*
   - *Plano de expansão detalhado*
   - *Relatório de convergência*
   - *CAPEX da expansão ótima*
   - *O&M fixo da expansão ótima*

- *Custo médio de longo prazo*
- *Custo marginal de longo prazo*

f) *Ferramentas*
   - *Ativar Dashboard:* Permite a ativação da abertura automática do painel *dashboard* após cada execução do modelo.

g) *Idioma*: Permite que o usuário selecione o idioma da interface gráfica e dos relatórios de saída:
   - *Inglês*
   - *Espanhol*
   - *Português*

h) *Ajuda*: Proporciona o acesso aos seguintes documentos:
   - *Lista de alterações detalhadas*: Arquivo que contém uma breve explicação sobre as últimas modificações e melhorias feitas no modelo, normalmente relacionadas a versões menores do modelo.
   - *Atualizar licença*: Se o usuário recebe a mensagem de erro "Wrong Hard Lock – Error code 0003", deve-se primeiramente usar esta opção para atualizar o arquivo de licença e tentar executar o modelo novamente. Se esta mensagem de erro continuar a aparecer, o usuário deve entrar em contato com o serviço de suporte do OptGen através do e-mail: optgen@psr-inc.com
   - *Manual de metodologia*: Opção para acessar o manual de metodologia do OptGen
   - *Manual do usuário:* Opção para acessar o manual do usuário do OptGen

Na segunda linha do menu estão localizados os botões com as opções mais frequentes, de acordo com a tabela a seguir:

Botão	Opção
	Abrir
	Salvar
	Executar SDDP
	Cronograma de desembolsos
	Dados de projeto
	Plano de expansão definido pelo usuário
	Restrição de energia firme
	Restrição de potência firme
	Restrições adicionais mínimas e máximas
	Cenários de vazão
	Calculadora de dia típico

	Otimização
	Limpar diretório do caso
	Verificar dados
	Graficador
	Abrir Dashboard
	Relatórios
	Sair
	Ajuda

3.1.2 Tela principal

A tela principal é dividida em quatro seções:

a) Opções de estudo

Constituem as opções de execução gerais de um estudo de expansão, relacionadas com os critérios de planejamento, horizonte de estudo, parâmetros econômicos etc.

b) Seleções

Projetos

Esta aba apresenta todos os projetos candidatos que existem na base de dados OptGen-SDDP. Nesta tela, o usuário é capaz de (i) visualizar um resumo das características do projeto na parte inferior da tela, ao clicar sobre o projeto e (ii) marcar (ou desmarcar) cada projeto a ser considerado (ou não) na execução corrente do OptGen.

Restrições

Esta aba apresenta todas as restrições definidas na tela "Restrições adicionais mínimas e máximas" e o usuário pode escolher quais serão contempladas ou não na execução.

Cenários de vazão

Contém a seleção de um ou mais Cenários de vazão que serão considerados no estudo e suas probabilidades de ocorrência correspondentes. É importante notar que esses cenários só serão utilizados se a opção "Modelo de operação" está configurada para "Cenários", nos campos de "Planejamento da expansão" ou "Simulação do plano de expansão" na aba "Opções de estudo".

Cenários críticos

Contém a seleção do grupo de sensibilidades que foram criadas para emular as condições de severidade que são consideradas no módulo de resiliência durante a fase de planejamento da expansão. Esses cenários só serão utilizados se a opção "Resiliência (Cenários críticos)" estiver selecionada no campo de "Planejamento da expansão" na aba "Opções de estudo".

c) Opções de execução

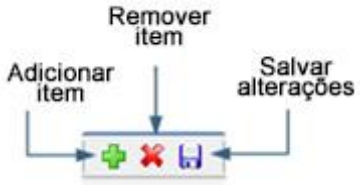
Contém a especificação de parâmetros de execução e de convergência, e também a seleção de procedimentos heurísticos de solução.

3.2 Como navegar

3.2.1 Abrir, editar e salvar dados

A barra de ferramentas da interface (segunda linha do menu principal) permite que o usuário abra as telas associadas a cada tipo de dados. Ao clicar em um dos botões, a tela de visualização e edição correspondente aos dados abre imediatamente. Uma lista exibe itens na ordem em que foram adicionados, e o primeiro item é selecionado automaticamente.

Na parte superior da tela de dados, há uma barra de ferramentas que contém as opções para adicionar e remover itens, como mostrado abaixo, e outras opções específicas para cada tipo de dados.



Ao selecionar um item da lista, todos os campos na tela estão associados com as informações deste item. Todos os campos habilitados podem ser editados. Caso ocorra qualquer alteração de dados, aparecerá uma tela solicitando confirmação para salvar essas modificações. O usuário pode optar por salvar ou ignorar as modificações. Esta mensagem permite ao usuário descartar modificações indesejáveis.

Um botão de informação está disponível em algumas funcionalidades para esclarecer sobre seu uso. Descanse o mouse sobre ele e uma mensagem informativa será exibida.

3.2.2 Manipulação de dados

OptGen incorpora uma série de controles do Microsoft Excel que podem ser utilizados em todas as telas que contém células no formato de planilhas Excel, como cenários de vazão, restrições de potência / energia firme e outras telas. Desta forma, o OptGen está provido com uma ferramenta poderosa de edição e análise de dados, que inclui: (i) a compatibilidade com as planilhas MS Excel, ou seja, o usuário pode gerenciar os dados usando uma planilha do Excel e depois carregá-la no OptGen, utilizando as funções de copiar/colar do Windows; e (ii) botões para cortar, copiar e colar diretamente na interface.

O próximo capítulo descreve todas as telas e dados de entrada do OptGen seguindo a ordem com que as opções estão disponíveis na interface.

4 DADOS DE ENTRADA

A fim de criar um estudo de caso de planejamento da expansão, o usuário deve informar os dados de investimento e de operação de todos os componentes de um sistema de energia elétrica. Todos os dados de entrada de operação são tratados pelo modelo SDDP e a descrição detalhada está disponível no Manual do Usuário do SDDP.

Neste capítulo estão descritos em detalhe os dados de entrada de investimento, que são tratados pelo OptGen. A descrição de dados respeita a ordem dos botões no menu principal do OptGen da esquerda para a direita.

4.1 Cronogramas de desembolsos

Diferentes cronogramas de desembolsos podem ser criados para atender as características de diferentes tipos de projetos. As opções de configuração são:

a) Código

b) Número de desembolsos

Representa o número de desembolsos anuais (geralmente realizados durante a construção do projeto) para pagar o custo de investimento de um projeto, e é usado pelo modelo a fim de calcular as despesas de capital (CAPEX) do projeto.

c) Ano de entrada em operação

Representa o ano relativo que o projeto iniciou sua operação desde a decisão de sua construção. Este valor deve ser igual ao número de anos utilizados na construção mais um.

d) Desembolso (%)

Representa a porcentagem do custo do investimento pago em cada desembolso anual. A soma de todos os pagamentos deve ser igual a 100%.

Para mais informações sobre os desembolsos do OptGen e como os cronogramas são usados tratados dentro do modelo, consulte a seção “Tratamento e cálculo do custo de investimento".

4.2 Dados do projeto

O modelo OptGen é bastante flexível e diferentes projetos candidatos podem ser contemplados em um estudo, tais como: (i) componentes de produção de energia: usinas hidrelétricas, térmicas e renováveis; (ii) links de interconexão e de circuitos de transmissão (linhas, transformadores, elos CC, etc.); (iii) gasodutos, nós de produção, estações de regaseificação. É importante, no entanto, explicar o que é um projeto candidato e como criar um. Para isso, vamos imaginar que estamos lidando apenas com componentes de produção de energia e vamos dividir as usinas em três tipos diferentes:

- **Tipo A**: usinas existentes;
- **Tipo B:** usinas futuras que possuem uma data de entrada em operação já definida (usinas comissionadas que normalmente fazem parte do plano de expansão de curto prazo e que já podem estar em construção);

- **Tipo C:** usinas futuras cuja decisão de entrada em operação, se serão construídas e quando, precisa ser otimizada (usinas ainda não comissionadas que fazem parte do portfólio de projetos candidatos para a expansão de longo prazo).

Uma vez que todos os dados de operação são definidos no modelo SDDP, então todas as usinas futuras de uma base de dados SDDP são elegíveis para serem consideradas como projetos pelo OptGen, ou seja, as usinas dos **Tipos B e C**. Este conceito é estendido a todos os outros agentes mencionados acima que podem ser considerados projetos candidatos.

Com base nisso e assumindo que todos os dados operativos já estão definidos no modelo SDDP, em seguida, na tela "Dados de projeto" do OptGen, existem duas maneiras de criar novos projetos: (i) adições individuais clicando no botão e selecionando uma das usinas futuras (**Tipo B ou C**); (ii) procedimento automatizado de importação clicando no botão , que importa todas as usinas futuras (**Tipos B e C**) presentes na base de dados SDDP.

Como uma boa prática, o procedimento de importação só deve ser aplicado uma vez, durante a criação do caso de planejamento da expansão. Depois disso, adições incrementais de projetos devem ser feitas individualmente. É importante mencionar que, se o usuário define ou modifica dados de alguns projetos e, em seguida, aplica o procedimento de importação, todos os dados de projetos anteriores serão substituídos.

4.2.1 Adição e eliminação individual de projetos

Ao clicar no botão , aparecem todos os agentes futuros definidos na base de dados SDDP. Em seguida, o usuário é capaz de filtrar por tipo de agente e/ou por sistema e selecionar o agente que deseja considerar como projeto. Depois disso, o usuário deve clicar em "Ok".

Após a criação, o usuário também é capaz de remover qualquer projeto clicando sobre o mesmo e, em seguida, no botão "Remover" que fica imediatamente à direita do botão "Novo". É importante mencionar que a eliminação de um projeto do OptGen não tem efeito sobre a base de dados operativa do SDDP, isto é, este procedimento não é capaz de eliminar o elemento futuro da base de dados SDDP.

4.2.2 Importação de projetos

Este recurso permite que o usuário crie automaticamente os dados de projetos para o módulo de investimento do OptGen importando todos os agentes futuros a partir de uma base de dados do SDDP.

Ao clicar no botão , aparece a tela de importação. O botão "Mostrar opções >>" permite ao usuário definir valores típicos para grupos de projetos para serem considerados pelo importador. Para cada grupo de projeto, é possível definir um custo de investimento, vida útil financeira e custo de O&M fixo. O usuário pode criar grupos de projetos mediante a seleção de intervalos de capacidade para cada tipo de projeto. Para projetos térmicos, no entanto, os grupos são criados de acordo com o tipo de combustível.

Nota importante: o processo de importação substitui, no diretório corrente, todos os dados anteriormente criados de projetos e cronograma de desembolsos.

É importante mencionar ainda que, ao aplicar este procedimento de importação, todas as usinas futuras dos **Tipos B e C** serão levadas como projetos para o OptGen. Mais detalhes a respeito serão fornecidos na próxima seção.

4.2.3 Compreendendo como são tratados os elementos (projetos ou não) e a integração automática entre o OptGen e o SDDP

Primeiramente, é importante esclarecer que existe uma separação clara das usinas definidas em uma base de dados SDDP: (i) usinas que só existem no modelo SDDP e (ii) usinas que o usuário seleciona como projetos para o modelo OptGen.

Para os elementos pertencentes ao grupo (i), os que só existem no SDDP, ou seja, os existentes e os elementos futuros que não são selecionados como projetos, todas as modificações definidas no modelo SDDP são sempre contempladas e nunca alteradas ou eliminadas pelo modelo OptGen.

Para os elementos pertencentes ao grupo (ii), elementos futuros selecionados como projetos, o próprio modelo OptGen controla todas as suas modificações **automaticamente**. Portanto, todas as modificações previamente definidas no SDDP para usinas selecionadas como projetos no OptGen serão **desconsideradas** automaticamente, uma vez que é tarefa do OptGen informar se o elemento deve ser construído e quando.

Apenas para exemplificar, se o usuário executa o OptGen e decide construir uma usina X em 2025, uma modificação nesta data será automaticamente impressa no arquivo de modificação do SDDP correspondente. Se o usuário acessa a tela de modificação na interface do SDDP, esta informação estará lá. No entanto, se o usuário fizer uma alteração no caso e executar o modelo novamente, então o OptGen irá apagar automaticamente a entrada da usina X em 2025 e irá fazer a otimização novamente. Se, nesta segunda execução, o OptGen decide que a usina X entra em operação em 2022, a modificação desta usina será impressa para 2022.

Agora, de volta à definição dos **Tipos A, B e C**, todas as usinas de **Tipo A** pertencem ao grupo (i) e todas as usinas de **Tipo C** pertencem ao grupo (ii). Com relação às usinas comissionadas, as de **Tipo B**, elas podem (ou não) ser consideradas como projetos para OptGen, dependendo da escolha do usuário. Vale a pena lembrar que se o procedimento de importação de projetos é aplicado, essas usinas serão automaticamente importadas como projetos. Se o usuário desejar, é possível removê-los manualmente dos dados de projeto. Neste caso, os elementos do **Tipo B** vão pertencer ao grupo (i), caso contrário, se essas usinas permanecem como projetos para o OptGen, eles pertencerão ao grupo (ii).

Geralmente, os usuários que os mantêm como sendo projetos, o fazem a fim de executar facilmente análises de sensibilidade, alterando suas datas de entrada em operação para saber os impactos no plano de expansão final. Como será explicado neste documento, o usuário pode definir um plano de expansão definido pelo usuário e fazer com que o modelo OptGen o leia através da opção "Leitura de plano de expansão". Assim, uma vez que o OptGen controla todos as modificações relativas aos projetos, se o usuário muda a data de entrada em operação do projeto no plano de expansão definido pelo usuário, esta alteração será automaticamente contemplada e tratada pelo modelo OptGen.

Em resumo, todas as modificações relacionadas a elementos que não são definidos como projetos para o OptGen, nunca serão alteradas pelo OptGen, somente o usuário pode alterá-las

manualmente. Por outro lado, todas as modificações referentes aos projetos são controladas pelo OptGen automaticamente.

4.2.4 Decisão e tipos de variáveis de projetos

A decisão do projeto e os tipos de variáveis estão localizados imediatamente abaixo da tela de seleção do projeto e estão descritos nesta seção. Nas seções seguintes, serão explicadas detalhadamente as abas de "Dados financeiros", "Dados do projeto" e "Custos cronológicos".

a) Tipo de decisão

Permite ao usuário escolher se a decisão de investimento do projeto é opcional ou obrigatória. Para projetos **opcionais**, o OptGen decide **quando** e **se** deve ser construído ou não. Para projetos **obrigatórios**, a decisão de construir o projeto já está tomada de antemão e, como consequência, o modelo só decide **quando** deve ser construído, respeitando as datas mínimas e máximas de entrada em operação do projeto.

b) Tipo de variável

Permite ao usuário escolher se a decisão de um projeto é representada no problema de otimização por uma variável contínua, binária ou inteira.

No caso de variável **contínua**, o OptGen pode decidir construir qualquer percentual (**entre 0% e 100%**) da capacidade do projeto. Esta opção é normalmente aplicada para: (i) novos *hotspots* de projetos renováveis intermitentes, para os quais o usuário define o potencial máximo que é aceito em cada *hotspot* e executa o OptGen para determinar a quantidade ótima para o sistema; (ii) em alguns estudos específicos quando a configuração detalhada das usinas térmicas não é necessária e o usuário busca otimizar o mix de tecnologia de geração (geralmente para o ano horizonte do estudo); (iii) projetos genéricos para dimensionar novas exigências em baterias, interconexões e elos CC.

Para variáveis **binárias**, o modelo só pode decidir se quer construir toda a potência do projeto ou não (**0% ou 100%**). Esta opção é normalmente utilizada para (i) projetos hidrelétricos; (ii) projetos térmicos, quando todos os detalhes do projeto estão disponíveis e (iii) projetos de transmissão.

À medida que o tempo requerido pelo modelo para otimizar o problema de expansão vê-se substancialmente afetado pelo número de variáveis binárias ou inteiras, o usuário também pode definir projetos que são representados pelas variáveis binárias durante os primeiros estágios e contínuos para o período restante de planejamento. A opção "Contínua a partir de" representa a data em que uma variável de decisão binária será substituída por uma variável contínua dentro do problema de otimização da expansão.

Para variáveis **inteiras**, o OptGen considera o projeto como sendo módulos binários que podem ser adicionados várias vezes enquanto forem economicamente atrativos durante o processo de otimização. Um limite superior sobre o número total de módulos idênticos que podem ser adicionados deve ser definido no campo "Número máximo de projetos".

4.2.5 Dados financeiros

a) Custo de investimento (M$ ou $/kW ou M$/ano)

Conforme apresentado acima, existem três tipos de unidades em que o usuário pode definir o custo de investimento para cada projeto. É importante notar que dentro do modelo, independentemente da unidade escolhida, o fluxo de caixa de investimento será sempre calculado conforme descrito na seção "Tratamento e cálculo do custo de investimento".

b) *Custo de O&M ($/kW ano)*

Representa o custo fixo anual de operação e manutenção do projeto.

c) *Custo de integração elétrica ($/kW)*

Representa o custo para conectar o projeto à rede elétrica. Normalmente reflete os custos de subestação e linha de transmissão de uso exclusivo que são necessárias para conectar a usina à rede.

d) *Taxa de desconto anual do projeto (%)*

Representa a taxa de interesse utilizada para calcular o custo de investimento anualizado do projeto caso seja definido em M$ ou $/kW. Entretanto, para calcular o valor presente líquido (VPL) dos desembolsos, o OptGen usa a taxa de desconto sistêmica definida na aba "Opções de Estudo> Parâmetros gerais" da tela principal.

Se esta opção estiver ativada, o OptGen usa a taxa de desconto definida neste campo para calcular o custo anualizado. Caso contrário, o modelo usa a taxa de desconto sistêmica.

e) *Cronograma de desembolsos*

Identifica o cronograma de desembolso usado pelo projeto e definido na tela "Cronograma de desembolsos".

f) *Vida útil financeira (anos)*

Representa o tempo de amortização do custo de investimento total do projeto.

g) *Substitui um agente*

Identifica um agente (usina, interconexão, circuito de transmissão etc.), que será substituído caso o projeto entre em operação. Esta opção é geralmente aplicada para avaliar as opções de repotenciação, remodelação e aposentadoria do projeto.

h) *Fator de capacidade médio, fator de capacidade garantido e fator de utilização (%)*

Para cada projeto, o OptGen calcula um **custo marginal de referência** ($/MWh) e o imprime no relatório de execução. O custo marginal de referência é calculado conforme a seguir:

Usinas hidrelétricas:

$$\frac{ca \cdot 10^6}{\omega \cdot MF \cdot 8760h}$$

Usinas térmicas:

$$\frac{ca \cdot 10^6 + co \cdot \omega \cdot MF \cdot 8760h}{\omega \cdot WF \cdot 8760h}$$

Usinas renováveis:

$$\frac{ca \cdot 10^6}{\omega \cdot MF \cdot 8760h}$$

Interconexões, elos CC e circuitos:

$$\frac{ca \cdot 10^6}{\omega \cdot UF \cdot 8760h}$$

Onde:

ca	Custo de investimento anual	M$
co	Custo operativo unitário	$/MWh
ω	Capacidade instalada	MW
MF	Fator de capacidade médio	p.u.
WF	Fator de capacidade garantido	p.u.
UF	Fator de utilização	p.u.

O usuário define MF, WF, e UF, dependendo da tecnologia do projeto. Com base nisso, o OptGen calcula o custo marginal de referência de cada projeto e o imprime no relatório de execução (arquivo optgen.out). O custo marginal de referência, também conhecido na literatura como Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost of Energy – LCOE,* em inglês), é uma métrica para comparar diferentes tecnologias diretamente em $/MWh. Como pode ser visto, o cálculo mencionado acima é baseado somente em parâmetros definidos pelo usuário como dados de entrada, portanto, os custos marginais de referência são apenas informativos e não afetam os resultados da otimização durante a execução do OptGen. Por outro lado, é muito importante ressaltar que o *LCOE* final de cada projeto é resultado do processo de otimização, uma vez que o fator de despacho de todas as usinas vai depender da operação do sistema que contempla o plano de expansão ótimo para todo o horizonte de estudo. Como consequência, os custos marginais de referência devem ser vistos como uma informação de pré-processamento para fornecer sensibilidade de competitividade de cada tecnologia em comparação com as demais.

4.2.6 Cronograma de entrada

a) Datas mínima e máxima

Representam as datas mínima e máxima para a entrada em operação do projeto se o modelo decide construí-lo.

b) Vida útil operativa

Representa o número de anos que o projeto permanece em operação. Em termos práticos, após este período, o projeto terá sua capacidade zerada e não mais pagará por custos de O&M.

c) Cronograma de entrada de unidades

Durante a construção de um projeto de geração, é possível que a usina não possa ser ligada totalmente de uma vez, devido ao processo de comissionamento e motorização da usina. Este dado representa o cronograma de entrada das unidades de um projeto. O usuário pode especificar até dez estágios para motorizar a usina através de uma tabela de dados cronológicos com o número de unidades de geração e a etapa de entrada relativa correspondente. A principal aplicação desta opção é para grandes projetos de usinas hidrelétricas, mas também pode ser aplicada também a projetos térmicos e renováveis.

Para exemplificar, vamos imaginar uma usina que tem quatro unidades geradoras. As duas primeiras unidades entraram na data de entrada em operação do projeto e as outras duas entraram em operação seis meses depois. Assim, na primeira coluna, o usuário deve definir: linha “Mês” = 1; linha “Unidades” = 2. Na segunda coluna, o usuário deve definir: linha “Mês” = 6; linha “Unidades” = 2.

4.2.7 Custos cronológicos

4.2.7.1 Custos de investimento e O&M

Nesta tela, o usuário é capaz de definir o custo de investimento do projeto variando no tempo. Na primeira coluna, o usuário define o ano, na segunda o custo de investimento (respeitando a mesma unidade escolhida para o projeto) e na terceira o custo fixo de O&M. Estes custos estão associados ao ano de decisão do projeto, com o custo de O&M fixo sendo aplicado em todos os anos da vida útil operativa. Isso significa que se o OptGen decidir construir o projeto no ano X, os custos de investimento e de O&M fixo durante toda a vida útil do projeto serão os definidos para este ano X. Se o OptGen decidir construir o projeto no ano Y, esses custos ao longo da vida útil do projeto serão aqueles definidos para o ano Y e assim por diante.

Por exemplo, vamos supor um estudo de planejamento de 3 anos (2020-2022) e um projeto com os seguintes custos de O&M cronológicos:

Ano	O&M ($/kW ano)
2020	10
2021	20
2022	30

Se o projeto é selecionado para entrar em operação no ano 2020, será pago 10 $/kW em 2020, 2021 e 2022. Se ele é selecionado para entrar em 2021, será pago 20 $/kW em 2021 e 2022; e se ele for selecionado para entrar em 2022, então será pago 30 $/kW em 2022. Em resumo, conforme comentado anteriormente, esses custos estão associados ao ano da decisão do projeto.

Esta opção é particularmente útil para incorporar curvas de redução de CAPEX geralmente relacionadas às energias renováveis não convencionais (como solar e eólica *onshore*/*offshore*) e baterias, uma vez que o preço destas tecnologias vem caindo em todo o mundo devido à maturidade tecnológica e ganhos de escala econômicos.

4.2.7.2 Custos de O&M variáveis

Nesta aba o usuário tem a opção de informar diferentes custos de O&M que serão considerados a cada ano da vida útil operativa do projeto. Então, caso o usuário ative a opção “Considerar custos de O&M variáveis”, os custos de O&M (fixos) que devem ser definidos nesta tela mudam ao longo do tempo após a entrada em operação, ou seja, o valor definido para o ano 1 será utilizado para o primeiro ano de operação; o valor definido para o ano 2 será utilizado para o segundo ano de

operação, e assim sucessivamente. Quando selecionado para ser considerado, este dado sobrescreve todas as demais informações de custo de O&M para cada projeto.

Por exemplo, vamos supor um estudo de planejamento de 3 anos (2020-2022) e um projeto com os seguintes custos de O&M cronológicos:

Ano	O&M ($/kW ano)
1	10
2	20
3	30

Se o projeto é selecionado para entrar em operação no ano 2020, será pago 10 $/kW em 2020, 20 $/kW em 2021 e 30 $/kW em 2022. Se ele é selecionado para entrar em 2021, será pago 10 $/kW em 2021 e 20 $/kW em 2022; e se ele for selecionado para entrar em 2022, então será pago 10 $/kW em 2022.

4.2.8 Tratamento e cálculo do custo de investimento

A fim de avaliar o custo de investimento associado à construção de cada projeto para cada possível estágio do horizonte de estudo, os seguintes dados de entrada são considerados pelo modelo (levando em conta um exemplo numérico para se tornar mais intuitivo):

Cronograma de desembolsos:

N	número de desembolsos	2	
n^0	ano de entrada em operação	2	
p_n	desembolsos	[60%; 40%]	%

Dados do projeto:

c^{inv}	custo de investimento	99	M$
c^{ele}	custo de integração elétrica	10	$/KW
$c^{o\&m}$	custo fixo de operação e manutenção	10	$/KW-ano
ω	capacidade instalada	100	MW
L	vida útil financeira	10	anos
tx^{prj}	taxa de desconto do projeto	10%	%

Neste exercício, vamos imaginar que o horizonte de estudo T é 2030-2039 e que o projeto entra em operação em 2031 (segundo ano do horizonte de estudo). Neste caso, os seguintes desembolsos anuais são necessários para pagar o custo de investimento do projeto:

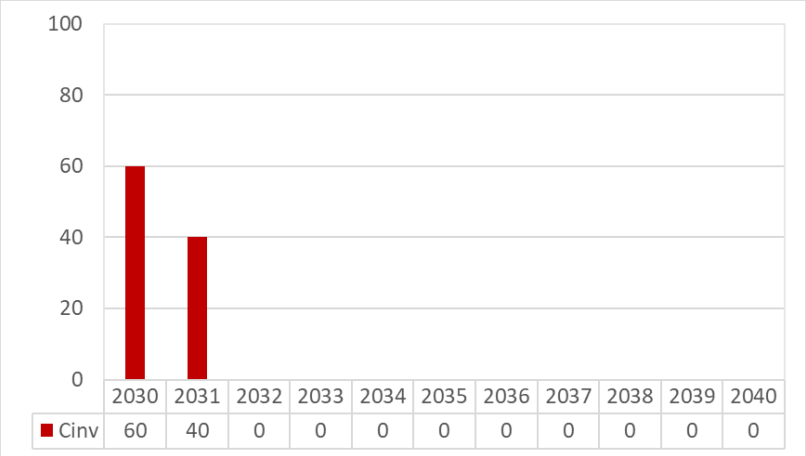


Figura 4.1 - Desembolsos anuais para pagar o custo de investimento do projeto

Em seguida, os seguintes passos são realizados automaticamente pelo modelo OptGen:

Passo 1: a soma do custo de investimento e custo de integração elétrica são referidos ao ano de entrada em operação, considerando o cronograma de desembolsos, como segue:

$$c0 = \left(c^{inv} + \frac{c^{ele} \cdot \omega}{1000}\right) \cdot \sum_{n=1}^{N} \frac{p_n}{100} \cdot (1+tx)^{(n^0-n)}$$

$$c0 = 100 \times (0.6 \times 1.1 + 0.4) = 106 \text{ M\$}$$

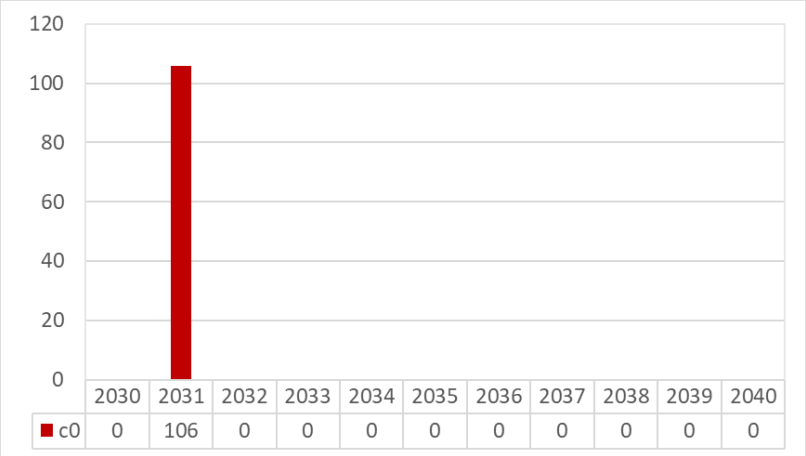


Figura 4.2 - CAPEX total do projeto

Passo 2: o custo do investimento anual (ou custo anualizado) é calculado e contemplado como um fluxo de pagamentos periódicos durante a vida útil financeira do projeto, que por sua vez corresponde ao custo total de investimento. Em seguida, o custo fixo de operação e manutenção é agregado a este valor:

$$ca = c0 \cdot \frac{tx \cdot (1+tx)^{(L-1)}}{(1+tx)^L - 1} + \frac{c^{o\&m} \cdot \omega}{1000}$$

$$ca = 106 \cdot \frac{0.1 \cdot (1.1)^9}{(1.1)^{10} - 1} + 1$$

$$ca = 16.68\ M\$/ano$$

A figura abaixo apresenta o fluxo de caixa de investimento do projeto dentro do horizonte de estudo:

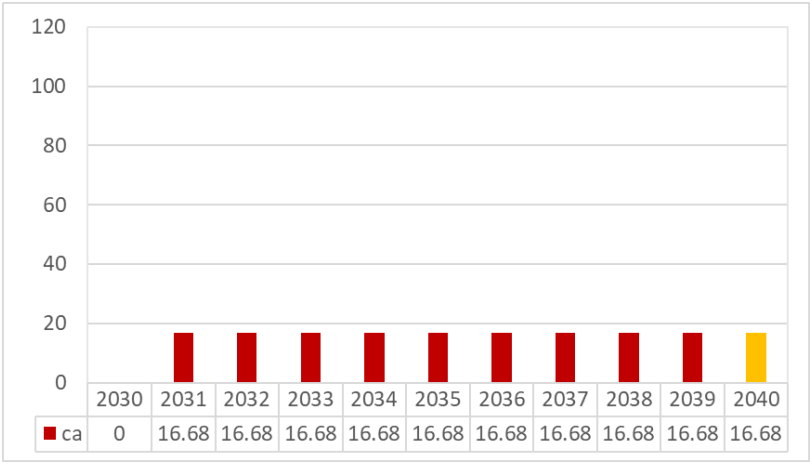


Figura 4.3 - Fluxo de caixa do projeto dentro do horizonte de estudo 2030-2039

Ainda que este fluxo de caixa possa começar antes da data de entrada em operação do projeto (durante o período de construção) e finalizar muitos anos depois do final do horizonte de estudo, as anualidades consideradas pelo modelo estão associadas ao período em que o projeto opera dentro do horizonte de estudo. Como se pode ver neste exemplo, existem apenas 9 pagamentos anuais dentro do horizonte de estudo e a vida útil financeira do projeto é de 10 anos. Neste caso, o modelo transforma automaticamente os custos anuais posteriores ao final do horizonte em um valor terminal. Isso será mais bem detalhado no decorrer desta seção.

Passo 3: Calcula-se o valor presente líquido (VPL) deste fluxo de caixa referido ao ano de entrada em operação.

$$ce = ca \cdot \frac{(1+tx)^{L'} - 1}{tx \cdot (1+tx)^{(L'-1)}}$$

onde L' é o número de anos em que o projeto opera dentro do horizonte de estudo:

$$L' = min\{T - t^0 + 1, L\}$$

Portanto, o valor de co neste caso será:

$$ce = 16.68 \cdot \frac{(1.1)^9 - 1}{0.1 \cdot (1.1)^8}$$

$$ce = 105.68\ M\$$$

Passo 4: Agora, refere-se este custo ao ano inicial do estudo.

$$ct = ce \cdot \frac{1}{(1+tx)^{(t^0-1)}}$$

onde t^0 é o ano de entrada em operação:

$$t^0 = t + (n^0 - 1)$$

Consequentemente, neste caso exemplo ct será:

$$ct = 105.68 \cdot \frac{1}{(1.1)^1}$$

$$ct = 96.08\ M\$$$

A figura a seguir apresenta o VPL do custo de investimento do projeto:

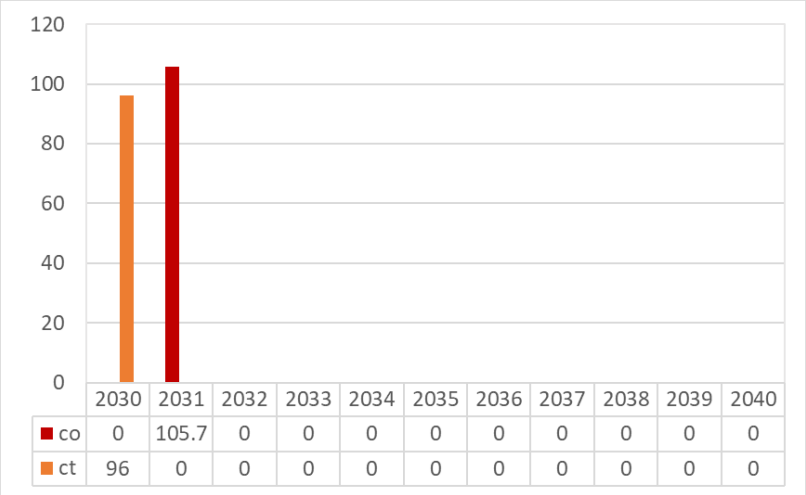


Figura 4.4 – VPL do custo de investimento do projeto

A tabela apresentada a seguir resume o VPL do fluxo de caixa de investimento e do valor residual, com base na data de entrada em operação t^0 do projeto:

t	t^0	L'	ct
1	2	9	96
2	3	8	81
3	4	7	67
4	5	6	55
5	6	5	43
6	7	4	33
7	8	3	23
8	9	2	15
9	10	1	7

Para calcular o valor terminal cr, definimos L^r como os anos de vida útil financeira do projeto após o fim do horizonte de estudo:

$$L^r = L - L'$$

Se $L' = L$, então $L^r = 0$ e, portanto:

$$cr = 0$$

Caso contrário, o valor terminal é calculado como o valor presente líquido dos desembolsos anuais associados aos anos após o fim do horizonte de estudo:

$$cr = ca \cdot \frac{(1+tx)^{L^r} - 1}{tx \cdot (1+tx)^{(T+L^r-1)}}$$

Em resumo, para o cálculo do custo de investimento, assumimos que os desembolsos anuais:

- começam no mesmo ano de entrada em operação
- terminam no último ano do estudo ou no final da vida útil financeira do projeto
- são pagos no início de cada ano

Com base nisso, o custo associado à decisão de construção de cada projeto em cada estágio de investimento é calculado para o período em que o projeto está disponível para operação. Consequentemente, durante o processo de otimização, ambos os custos de investimento e operação são contabilizados para o mesmo período dentro do horizonte de estudo.

Nas próximas seções estão descritas as restrições relacionais entre projetos. Estas restrições podem ser definidas imediatamente após a criação/importação dos projetos.

4.2.9 Projetos exclusivos

As restrições de "projetos exclusivos" são definidas clicando no botão . Esta opção permite ao usuário informar um conjunto de projetos mutuamente exclusivos. O modelo cria uma restrição de exclusividade de modo que **um** ou **nenhum** dos projetos da lista possa ser decidido para o investimento. Uma aplicação desta funcionalidade, por exemplo, é a seleção ótima de uma usina eléctrica a partir de um conjunto de projetos com diferentes tecnologias.

Procedimento:

1. Pressione o botão "Novo". Informe o nome da restrição e pressione "Ok".
2. Mova os projetos que serão incluídos nesta restrição à lista "Selecionado". Use os filtros para ajudar a encontrar projetos de tipo ou sistema específico.
3. Salve as alterações e saia da tela.

4.2.10 Projetos associados

As restrições de "projetos associados" são definidas clicando no botão . Esta opção permite ao usuário informar um conjunto de projetos associados. O modelo cria uma restrição de associação para que **todos** ou **nenhum** dos projetos da lista possam ser decididos para o investimento. Como os projetos associados podem ser construídos em diferentes etapas ao longo do horizonte de planejamento, o usuário também é capaz de definir um atraso máximo (em anos) para a entrada dos projetos.

Procedimento:

1. Pressione o botão "Novo". Informe o nome da restrição e pressione "Ok".
2. Mova os projetos que serão incluídos nesta restrição à lista "Selecionado". Use os filtros para ajudar a encontrar projetos de tipo ou sistema específico.

3. Informe o atraso máximo para a entrada em operação dos projetos.
4. Salve as alterações e saia da tela.

4.2.11 Restrições de precedência

As restrições de "precedência" são definidas clicando no botão . Esta opção permite ao usuário especificar a **ordem de entrada** dos projetos com um tempo de atraso mínimo.

Procedimento:

1. Pressione o botão "Novo". Informar o nome da restrição e pressione "Ok".
2. Mova projetos que serão incluídos nesta restrição à lista "Selecionado". Use os filtros para ajudar a encontrar projetos de tipo ou sistema específico.
3. Use as setas para cima e para baixo localizadas na parte direita da tela para mudar a ordem de prioridade dos projetos.
4. Informe o atraso mínimo para a entrada em operación entre os proyectos.
5. Salve as alterações e saia da tela.

4.3 Plano de expansão definido pelo usuário

Permite que o usuário crie um novo plano de expansão a ser considerado pelo modelo. Este recurso pode ser utilizado (i) para a avaliação de um plano fixo ou (ii) para contemplar um plano parcial, durante o processo de optimização, que deve ser complementado com projetos adicionais, se necessário. Para criar um novo plano de expansão, o usuário deve clicar no botão "Novo plano" .

Procedimento:

1. Selecione o tipo de plano:
    a. *Fixo*
    O modelo OptGen vai ler o plano de expansão e considerar todas as decisões como fixas, ou seja, não há margem para a otimização da expansão. Em termos práticos, esta é apenas uma otimização puramente de despacho (pode ser interpretada como uma execução do SDDP), com a vantagem de apresentar, como resultado, todas as saídas de investimento produzidas pelo OptGen.
    b. *Complementar com outros projetos se necessário*
    O modelo irá considerar os projetos que fazem parte do plano parcial definido pelo usuário como fixos e avaliará se vale a pena ou não construir qualquer outro projeto apresentado nos dados do projeto e selecionado para a execução corrente.
2. Use o botão "Adicionar projeto" ( ) para incorporar uma nova decisão de expansão ao plano.
    a. Selecione um projeto da lista. Use os filtros para ajudar a encontrar projetos de tipo ou sistema específico.
    b. Para um **plano fixo**, apenas a opção "Data de decisão> Fixa" está disponível. Neste caso, informe a data de decisão e a capacidade adicionada (MW).
        i. Ativar ou não a opção "Decisão planejada":
            - Neste caso, para todos os projetos, esta opção é meramente ilustrativa e utilizada somente nos relatórios de saída. A principal ideia por trás desta opção é diferenciar projetos entre si, ou seja, esta opção é usada para separar projetos que na prática já estão em construção (decisões

planejadas) dos projetos que o usuário fixa com base em suas próprias suposições (decisões não planejadas oficialmente). Esta informação é impressa na décima coluna do arquivo de plano de expansão ótimo.

c. Para um **plano complementar**, o usuário deve:
   i. Selecionar a data de decisão como "Fixa" ou "Variável". No caso "Variável", o usuário especifica datas inicial e final, e o modelo otimiza a decisão dentro deste intervalo de tempo.
   ii. Selecionar o tipo de decisão como "Exata", "No mínimo" ou "No máximo" o valor especificado para a capacidade adicionada (MW). Escolhendo a opção de decisão "Exata" significa que o OptGen investirá exatamente o valor da capacidade especificada; a decisão "No mínimo" significa que o OptGen investirá mais ou igual ao valor da capacidade especificada; por fim, a decisão "No máximo" significa que o OptGen investirá menos ou igual ao valor da capacidade especificada. Baseado nisso:
      - Para variáveis de decisão **binária**: é intuitivo ver que somente a opção "Exata" pode ser selecionada. Neste caso, o projeto será construído na data fixa ou dentro do intervalo de datas, dependendo da opção "Tipo de decisão";
      - Para variáveis de decisão **contínua** ou **inteira**: se o usuário selecionar a opção "Exata", o valor exato da capacidade definido pelo usuário será construído na data fixa ou no intervalo de datas, dependendo da opção "Tipo de decisão". Ao selecionar as opções "No mínimo" ou "No máximo", o valor da capacidade será considerado, respectivamente, como limite inferior e superior de investimento na data fixa ou dentro do intervalo de datas definido.
   iii. Ativar ou não a opção "Decisão planejada":
      - No caso de variáveis de decisão **binária**: esta opção é meramente ilustrativa e utilizada somente em relatórios de saída. Esta informação é impressa na décima coluna do arquivo de plano de expansão ótimo.
      - No caso de variáveis de decisão **contínua** ou **inteira**: essa opção afeta o processo de otimização. Se ativada, o usuário não permite que o modelo adicione mais capacidade a esses projetos fora da data fixa ou fora do intervalo de datas especificado, uma vez que esses projetos já estão em construção com a capacidade exata definida pelo usuário. Se desativada, o modelo está livre para adicionar mais capacidade do projeto em qualquer outra data que seja diferente da fixa, ou fora do intervalo de datas especificado.

3. Use o botão "Remover" ( ) para eliminar uma decisão de expansão selecionada do plano.
4. Use o botão "Editar" ( ) para modificar datas e valores de uma decisão de expansão selecionada do plano. Para mais detalhes, consulte o passo 2.
5. Use o botão "Salvar" ( ) para definir o nome do arquivo do plano de expansão.

Também é possível abrir e editar planos de expansão previamente definidos. A tela mostra um plano de cada vez. Para selecionar outro plano, use o botão "Abrir" ( ).

Após criado um plano de expansão, aparecerá automaticamente como selecionado o campo "Leitura de plano de expansão" na tela principal do OptGen.

4.4 Restrições de energia/potência firme

Permite que o usuário especifique restrições de energia firme ou de potência firme para cada um ou todos os sistemas. Ao clicar no botão , a tela "Restrição de Energia Firme" será exibida. Se o usuário clicar na seta localizada ao lado desse botão, o usuário poderá escolher entre acessar a tela "Restrição de energia firme" ou "Restrição de potência firme".

4.4.1 Definição de restrição de energia firme

Antes de explicar como definir os dados de entrada, vale a pena fornecer uma visão geral dessas restrições. O conceito de oferta firme surgiu no final do século XIX, quando se estudou o dimensionamento de reservatórios para abastecimento de água à população. O objetivo era determinar a capacidade de armazenamento que garantiria uma vazão "firme" na ocorrência da sequência histórica mais seca.

O conceito de oferta firme foi transferido para o setor elétrico e aplicado ao dimensionamento econômico de projetos hidrelétricos. Essencialmente, para cada alternativa de capacidade do reservatório e instalação de máquinas, foi calculada a energia firme resultante (capacidade sustentável de produção de energia). A relação entre o custo de construção de cada alternativa e sua respectiva energia firme foi usada como um índice de custo/benefício que permitiu comparar diferentes alternativas de projeto.

O conceito de energia firme foi então estendido a um conjunto de usinas, com o objetivo de garantir uma certa quantidade de produção de energia, permitindo oscilações na produção de cada planta. Esse conceito foi amplamente utilizado em estudos de inventário, que serviram para definir a "divisão de queda" de cada rio.

Posteriormente, um critério probabilístico foi proposto. Em vez de garantir um suprimento firme de água (ou energia) considerando as vazões históricas (em particular, a “oferta firme” é superiormente limitada pela pior seca histórica), a “energia assegurada” foi calculada como a produção máxima que pode ser mantida em uma determinada porcentagem - por exemplo, 95% - dos anos hidrológicos simulados. Este critério probabilístico, juntamente com a consideração do impacto econômico das falhas de suprimento, passou a permitir uma análise mais detalhada da relação custo/benefício dos investimentos.

Em resumo, em países predominantemente hidrelétricos (sistemas com restrição de energia), como no caso do Brasil, os critérios de energia firme estão relacionados à segurança do fornecimento e são geralmente definidos para minimizar o risco de racionamento, protegendo o sistema de situações extremas. Como dito acima, existem diferentes metodologias que podem ser aplicadas para calcular o “certificado” de energia firme de cada usina, o qual poderia ser baseado em (i) um critério probabilístico ou (ii) um critério determinativo, por exemplo, a partir da energia máxima que cada usina pode produzir com o pior registro histórico de vazão (também conhecido como período crítico).

Em termos da planificação da expansão do sistema, o usuário é capaz de atribuir certificados de energia firme para as usinas (existentes e futuras) e um requerimento sistêmico a ser cumprido em cada ano (ou em cada estágio de investimento, se desejado). Isso é interessante porque essas restrições entram como critérios inflexíveis de planejamento dentro do módulo de investimento, ou seja, o modelo OptGen precisa obedecê-las, caso contrário, o problema de otimização é inviável.

4.4.2 Definição de restrição de potência firme

Em sistemas com restrição de capacidade, a principal preocupação na tarefa de planejamento da expansão é garantir que o sistema seja capaz de atender ao pico de demanda no longo prazo. Portanto, a fim de proteger o sistema contra interrupções (inesperadas) forçadas e falta de geradores disponíveis no sistema em situações de "estresse", que geralmente acontecem em momentos de pico de demanda, o usuário deve incorporar um critério de planejamento para garantir uma certa quantidade (mínima) de excesso de oferta. Esta quantidade é definida como **margem de reserva**. A **margem de reserva** é a diferença entre a capacidade disponível do sistema e a demanda e, como consequência, deve incorporar requerimentos de reservas quentes e frias.

Baseado nisso, o usuário pode atribuir um "certificado" de potência firme de cada planta (também conhecido como crédito de capacidade) e um requerimento sistêmico a ser cumprido em cada ano (ou em cada estágio de investimento, se desejado). Isso é interessante porque essas restrições entram como critérios inflexíveis de planejamento dentro do módulo de investimento, ou seja, o modelo OptGen precisa obedecê-las, caso contrário, o problema de otimização é inviável.

Como foi dito anteriormente, esta questão era uma preocupação importante apenas para os sistemas com restrição de capacidade. Por outro lado, com a rápida penetração das fontes de energia renovável variável (ERV) nos sistemas, esse cenário mudou.

A penetração dessas novas fontes também levantou algumas preocupações tanto para planejadores quanto para operadores por duas razões principais: (i) a maioria dessas fontes são não-despacháveis, ou seja, sua geração não pode ser controlada pelo operador do sistema; e (ii) sua produção de energia apresenta forte volatilidade, ou seja, a produção pode mudar significativamente de uma hora para a outra (devido à sua natureza flutuante). Como consequência, todos os sistemas com penetração massiva de ERV, que no passado poderiam ser classificados como com *restrição de energia* ou como *restrição de capacidade*, precisam se preparar para ter geração despachável suficiente em todos os momentos, já que não se pode garantir que o vento soprará e não haverá nuvens no céu. Portanto, a preocupação com a potência firme não existe apenas nos momentos de pico de demanda.

Em resumo, o requerimento sistêmico e a atribuição de crédito de capacidade devem ser cuidadosamente definidos, especialmente para energias renováveis intermitentes.

4.4.3 Definição de requerimentos de energia/potência firme

Em primeiro lugar, é importante lembrar que o usuário é capaz de adicionar restrições de energia firme e/ou potência firme, conforme desejado. Além disso, existem duas maneiras diferentes de definir a necessidade de energia/potência firme. A primeiro é feita através da especificação de um fator de energia/potência firme por ano.

Como explicado no início desta sessão, se o usuário clicar na seta localizada ao lado do botão , ele poderá selecionar se deseja acessar a tela de definição de "Restrição de energia firme" ou a de "Restrição de potência firme". Vale ressaltar que, operacionalmente falando, a definição de dados em ambas as telas é igual (e, claro, dentro do modelo, ambos são tratados de forma diferente).

Na tela "Energia firme" ou na tela "Potência firme", o usuário deve primeiramente selecionar se deseja incorporar um requerimento de energia/potência firme para "<Todos os sistemas>" e / ou para cada sistema (isso significa que o usuário pode definir um para "<Todos os sistemas>" e

também um para cada sistema, ou apenas para "<Todos os sistemas>"; ou apenas para um subconjunto dos sistemas definidos). Todos os sistemas existentes na base de dados do SDDP serão exibidos nesta tela de seleção.

Para explicar melhor por que as opções mencionadas estão disponíveis, podemos usar alguns exemplos. O sistema brasileiro é dividido em muitos sistemas e o requerimento de energia firme é definido para todo o país. Nesse caso, apenas um requerimento para "<Todos os sistemas>" é suficiente. Agora, imagine outro exemplo em que o usuário não quer depender de interconexões entre o sistema para atender a demanda. Neste caso, ele poderia incorporar uma restrição de energia/potência firme em cada sistema. Por outro lado, imagine que desejamos realizar um estudo com a base de dados da América Central contemplando seis países. Nesse caso, poderiam ser definidas restrições de energia/potência firme para cada sistema, sem a necessidade de definir para "<Todos os sistemas>", já que a importação/exportação dos países é baseada em oportunidades.

Com base nisso, vamos seguir para a definição do fator de energia/potência firme:

a) Fator de energia firme

O usuário define um fator por ano. Para cada ano, o OptGen soma a demanda em GWh definida em todos os blocos de todos os estágios e divide por 8760 horas, resultando na demanda em GWmédio (GWmed) para cada ano. Em seguida, o modelo multiplica esse valor pelo Fator de Energia Firme, definido pelo usuário em p.u. e, usualmente, maior que 1 p.u.

b) Fator de potência firme

O usuário define um fator por ano. Para cada ano, o OptGen pega a demanda em GWh definida em todos os blocos de todos os estágios e divide pela duração do bloco, resultando na demanda em GW para todos os blocos em todos os estágios de cada ano. Em seguida, o modelo seleciona o valor máximo observado no ano e multiplica pelo Fator de Potência Firme, definido pelo usuário em p.u. e, usualmente, maior que 1 p.u.

Como pode ser visto, a abordagem para modelar restrições de energia/potência firme através de fatores anuais é uma opção simples e direta, porém inflexível, ou seja, esses fatores são tratados dentro do modelo e o usuário não tem flexibilidade para definir qualquer restrição diferente. A segunda maneira de definir restrições de energia/potência firme é através de restrições adicionais mínimas e máximas, que serão detalhadas mais adiante neste documento. Esta opção é muito flexível, permitindo a representação de qualquer restrição de energia/potência firme definida pelo usuário. Nesse caso, o usuário inclui quantas usinas desejar, introduz o requerimento e também define as datas das restrições (incorporando, portanto, os estágios de investimento desejados).

4.4.4 Definição de certificado de energia/potência firme

Há dois procedimentos para definir o certificado de energia/potência firme de cada usina: (i) por um fator sistêmico por tipo de tecnologia ou (ii) por cada usina individualmente.

Vamos começar com o procedimento (i). Como a metodologia de atribuição de certificado pode mudar de sistema para sistema, primeiramente o usuário precisa selecionar cada sistema que deseja definir os fatores.

Procedimento:

1. Na lista da parte superior da tela, selecione o sistema ao qual o fator será aplicado.
2. Depois de selecionar o sistema, os campos “Valor padrão de energia/potência firme (p.u.)” serão destravados no canto superior direito da tela. Defina o valor padrão de energia/potência firme em p.u. para os diferentes tipos de usinas (hidrelétrica, térmica e renovável) do sistema selecionado.

Os valores padrão (antes da edição do usuário) são:

	Energia firme (p.u.)	Potência Firme (p.u.)
Usina hidrelétrica	0.6	1
Usina térmica	1	1
Fonte renovável	0	0

O segundo procedimento para definir o certificado de energia/potência firme de cada usina é: (ii) por cada usina individualmente. Isso pode ser feito nas telas “Dados de hidrelétricas” / “Dados de térmicas” / “Dados de fonte renovável”.

4.4.4.1 Dados de hidrelétricas / térmicas / fonte renovável

Essas telas permitem que o usuário defina os certificados de energia firme (MWmed) / potência firme (MW) para cada usina hidrelétrica / térmica / renovável presente em todos os sistemas. Os valores que aparecem automaticamente são os valores padrão para cada usina, ou seja, a capacidade instalada multiplicada pelo fator de energia / potência firme definido para a tecnologia (em p.u.). Vale ressaltar também que, para as usinas hidrelétricas, a “Capacidade (MW)” apresentada é o valor mínimo entre a capacidade instalada e o produto da vazão máxima turbinável e o coeficiente de produção médio.

É intuitivo que, se o usuário define um **valor específico** para uma determinada usina, esse valor anula o valor padrão e, caso contrário, se nenhum valor específico for definido para a usina, o valor padrão será aplicado.

4.4.4.2 Modificações de hidrelétricas / térmicas / fonte renovável

As telas de modificação permitem que o usuário altere no tempo os dados de configuração de energia firme (MWmed) / potência firme (MW) de usinas hidrelétricas / térmicas / renováveis. Modificações podem ser incluídas por usina na aba “Por usina” ou por data na aba “Por data” (esta última respeita a usina selecionada na aba “Por usina”). As modificações anularão as informações definidas em “Dados de hidrelétricas” / “Dados de térmicas” / “Dados de fonte renovável”.

4.4.4.3 Certificados de energia/potência firme durante o processo de comissionamento da usina

Conforme explicado na seção de cronograma de entrada, durante a construção de um projeto de geração, é possível que a usina não seja totalmente motorizada de uma vez e, como consequência,

apresente um cronograma de entrada das unidades. Neste caso, **durante a motorização**, os certificados são calculados da seguinte forma:

- Para térmicas e renováveis: os certificados de energia firme e de potência firme seguem a mesma lógica e são multiplicados por um **fator de disponibilidade**, que é calculado como o número de unidades em operação no estágio de investimento atual dividido pelo número total de unidades geradoras. Pode ser interpretado como um aumento linear proporcional ao número de unidades em operação.
- Para usinas hidrelétricas: o certificado de energia firme será o mínimo entre o certificado de energia firme e o produto da vazão máxima turbinável, o coeficiente de produção médio e o fator de disponibilidade. Isso significa que, até o valor do certificado de energia firme da usina, há água suficiente para as unidades que estão em operação e, portanto, a energia firme no dado estágio de tempo deve ser igual à capacidade instalada corrente da usina. Então, quando o certificado de energia firme da usina é alcançado, o valor permanece constante. Por outro lado, o certificado de potência firme será apenas multiplicado pelo fator de disponibilidade (mesma lógica aplicada para térmicas e renováveis).

4.5 Restrições adicionais mínimas e máximas

A tarefa de planejamento da expansão deve atender a critérios operacionais, econômicos e ambientais, no âmbito das políticas nacionais de energia. Consequentemente, restrições adicionais podem ser definidas nesta tela de maneira tal que o OptGen cumpra com os critérios definidos pelo usuário para atender as premissas do planejamento da expansão.

Esta tela foi projetada para ser muito flexível, a fim de englobar uma ampla gama de restrições adicionais que os usuários podem definir, tais como restrições específicas de margem de reserva, políticas governamentais relacionadas à inserção de uma determinada tecnologia, meta de penetração renovável, restrições orçamentárias etc.

Permite ao usuário informar as restrições de capacidade instalada ou restrições de energia / potência firme mínima e/ou máxima para um conjunto de elementos existentes e futuros.

Procedimento:

1. Pressione o botão "Novo". Informe o nome da restrição e pressione "Ok".
2. Selecione o tipo de restrição: “Capacidade instalada (MW)”, “Energia firme (MWmed)” ou “Potência firme (MW)”.
3. Selecione se a restrição é "Incremental" ou "Total":
    a. “Incremental”: neste caso, o usuário deve definir as datas inicial e final no passo 7.
    b. “Total”: neste caso, o usuário deve definir apenas a data final no passo 7.
4. Selecione o tipo de limite de restrição: “Mínimo (> =)” ou “Máximo (<=)”.
5. Selecione se o lado direito da restrição (*right-hand side* ou RHS) é um “Valor absoluto” ou uma porcentagem relacionada a um único sistema ou a todos os sistemas. Vale a pena notar que as opções de porcentagem só estão disponíveis no caso de restrições "Totais".
6. Informe o valor do RHS da restrição:
    a. Se a restrição for “Incremental”, o valor definido corresponde ao mínimo/máximo que pode ser adicionado no intervalo de tempo especificado no passo 7.
    b. Se a restrição for “Total”, o valor corresponde ao total até a data final especificada no passo 7.

7. Informe a data inicial (apenas para restrições “Incrementais”) e final.
8. Selecione os elementos que serão incluídos no lado esquerdo da restrição (*left-hand side* ou LHS). Use os filtros para ajudar a encontrar elementos de um tipo e/ou sistema específico. É muito importante enfatizar que não apenas projetos estão disponíveis nesta tela de seleção, mas todos os elementos existentes e futuros (pertencentes aos **Tipos A, B e C**) podem ser selecionados:
    a. No caso de uma restrição “Incremental”, uma vez que o limite inferior ou superior corresponde à quantidade **incremental** que pode ser adicionada no intervalo de tempo escolhido, geralmente apenas usinas futuras (pertencentes aos **Tipos B e C**) estão no LHS da restrição.
    b. No caso de uma restrição “Total”, uma vez que a data inicial não é especificada, o limite corresponde ao total mínimo/máximo que deve estar no sistema até a data final informada. Nesse caso, dependendo da aplicação, esta restrição pode (ou não) incorporar usinas existentes e comissionadas. Por exemplo, se o usuário definir uma restrição total para impor uma penetração máxima de térmicas a carvão no sistema, uma vez que deve englobar todas as usinas térmicas que queimam carvão, não apenas projetos, mas também plantas existentes e comissionadas (pertencentes aos **Tipos A, B e C**) devem estar no LHS da restrição.

4.6 Cenários de vazão

A incerteza hidrológica é considerada na otimização do problema de planejamento da expansão e sua representação depende do modelo operativo (SDDP ou Cenários) selecionado pelo usuário na aba “Opções de estudo” da tela principal do OptGen.

4.6.1 SDDP

Os dados hidrológicos históricos de cada usina, bem como os parâmetros do modelo estocástico considerado na operação do sistema são definidos na interface do SDDP. Para mais detalhes, consulte o Manual do usuário do SDDP.

4.6.2 Cenários

Os cenários de vazão hidrológica são definidos na interface do OptGen na tela “Cenários de vazão”, onde os valores são informados em m^3/s para todas as usinas hidrelétricas em cada estágio. Para criar um novo cenário, o usuário deve pressionar o botão “Novo” e selecionar como o cenário será gerado: manualmente ou extraindo do arquivo de cenários SDDP / TSL ou do arquivo de histórico do SDDP.

Quando a opção "Manual" é selecionada, o usuário pode adicionar apenas um cenário de cada vez:

1. Informe o nome do cenário e pressione o botão “Ok”.
2. Selecione cada usina hidrelétrica na lista à direita da tela.
3. Informe os valores de vazão para cada usina hidrelétrica em cada estágio. Esses dados são manipulados por uma tabela de dados cronológicos.

Quando a opção “Extrair do arquivo de cenários do SDDP / TSL” estiver selecionada, um conjunto de cenários será importado do SDDP ou do TSL (Time Series Lab) a partir do arquivo forw.dat. Para mais

informações sobre como este arquivo é gerado pelos modelos SDDP ou TSL, consulte o Manual do Usuário do modelo correspondente.

1. Selecione o arquivo forw.dat usando a ferramenta de navegação.
2. Pressione o botão “Ok”.
3. Todos os cenários são importados automaticamente do arquivo forw.dat com probabilidades de ocorrências idênticas, por *default*.
4. Selecione cada cenário da lista à esquerda e cada usina hidrelétrica na lista à direita da tela para visualizar e editar os valores de vazão.

Quando a opção “Extrair do arquivo de histórico do SDDP” estiver selecionada, o usuário importa um conjunto de cenários do arquivo hinflw.dat do SDDP.

1. Selecione o arquivo hinflw.dat usando a ferramenta de navegação.
2. Informe o número de cenários a serem extraídos e o número de anos que cada cenário terá.
3. Informe se o cenário MLT (média de longo prazo) deve ser incluído. Nesse caso, um dos cenários consistirá em um cenário estático que contém as vazões médias mensais de todo o histórico.
4. Informe o ano do arquivo histórico associado ao ano inicial de cada cenário.
5. Informe a probabilidade de ocorrência de cada cenário em p.u. O usuário pode optar por informar esses valores manualmente ou pressionando o botão "Gerar probabilidade automaticamente". Nesse caso, todos os cenários terão a mesma probabilidade. Observe que a soma das probabilidades de todos os cenários deve ser sempre igual a 1.
6. Informe se as vazões negativas devem ser convertidas em valores nulos.
7. Informe se os cenários devem ser estáticos. Nesse caso, as vazões correspondentes ao ano inicial especificado serão repetidas para todos os anos de cada cenário.
8. Pressione o botão “Ok”.
9. Selecione cada cenário da lista à esquerda e cada usina hidrelétrica na lista à direita da tela para visualizar e editar os valores de vazão.

Depois de criar todos os cenários de vazão, a seleção de cenários e a edição das probabilidades podem ser gerenciadas na aba “Seleção dos cenários” na tela principal.

4.7 Calculadora de dia típico

Em primeiro lugar, é importante ressaltar que a opção “Calculadora de dia típico” é útil apenas para a estratégia de solução “OptGen 2” (essa opção não afeta a estratégia de solução “OptGen 1”). Em seguida, é apresentada uma breve revisão sobre alguns conceitos importantes sobre o "OptGen 2":

- O modelo considera estágios anuais de investimento, ou seja, um problema de co-otimização do investimento e da operação é resolvido ano a ano, em um esquema de horizonte rolante;
- Cada ano é dividido em T estações do ano (por exemplo, meses ou trimestres). As estações são agrupamentos mais amplos de estágios do SDDP. Enquanto o SDDP suporta apenas estágios semanais e mensais, as estações podem durar de uma semana até um ano inteiro. As estações reduzem os tempos computacionais agregando estágios similares na mesma decisão operativa. As estações devem seguir a sazonalidade de cada sistema elétrico e devem ser cronológicas.
- Cada estação do ano é composta por D perfis de carga de 24 horas (por exemplo, dias úteis e feriados/fins de semana), também chamados de **dias típicos**. Os dias típicos são dias dentro

de uma estação que são considerados representativos dos dados de entrada. Assim, em vez de representar todos os dias de uma estação, o usuário deve selecionar um determinado número de dias típicos para representar diferentes perfis de carga de cada estação do ano. Nesse caso, cada dia típico representa um grupo de dias "reais" (obviamente, com perfis de carga semelhantes). Por exemplo, é comum diferenciar o dia da semana do final de semana. Um terceiro grupo também poderia ser criado representando apenas domingos e feriados;

- Para cada estação do ano, podem ser considerados S cenários de geração renovável e vazões hidrológicas;
- A operação do sistema é calculada a cada hora, com *unit commitment*, reserva de geração (incluindo baterias e outros dispositivos de armazenamento) e interconexões regionais (um modelo de rede de transmissão completo também está disponível).
- Como o "OptGen 2" modela a operação do sistema usando etapas cronológicas horárias com *unit commitment*, mesmo aplicando as suposições e heurísticas supracitadas, para alguns sistemas reais de grande escala, o esforço computacional pode ser muito alto. Nesse caso, outro tipo de heurística está disponível, que é chamado de **blocos de *commitment* por dia**. Os blocos de compromisso são usados apenas para vincular decisões de *commitment* térmico. Em outras palavras, o modelo decidirá, no início de cada bloco, o estado operativo das usinas térmicas que representam *unit commitment*, e manterá o mesmo estado até o final do bloco.

Para mais detalhes metodológicos, consulte o Manual de Metodologia do OptGen.

Com base na análise acima mencionada, a opção "Calculadora de dia típico" cria automaticamente as estações do ano, os dias típicos e os blocos de *commitment* por dia. Então, depois de clicar no botão , existem dois parâmetros que devem ser preenchidos:

d) Número de estações por ano

O usuário deve informar o número desejado de estações no ano. Para casos mensais, o valor padrão é de 12, significando que cada mês será uma estação do ano. Para os casos semanais, o valor padrão é de 52 significado que cada semana vai ser uma estação do ano.

e) Número de blocos de commitment por dia

O usuário deve informar o número de horas desejado em cada bloco de *commitment* por dia. O valor padrão é 24, o que significa que a decisão de *unit commitment* é feita a cada hora de cada dia típico dentro de cada estação do ano.

Vale ressaltar que essa execução requer dados de mapeamento hora-bloco já definidos na base de dados do SDDP. Para mais informações, consulte o Manual do Usuário do SDDP.

Depois de definir esses parâmetros, o usuário pressiona o botão "Executar". A calculadora então realiza as seguintes ações:

- Mapeamento de meses/semanas para estações do ano;
- Mapeamento de dias reais para dias típicos. A calculadora irá criar dois dias típicos em cada estação do ano (dias úteis e fins de semana). O primeiro dia típico de cada estação será calculado com base em todos os dias de semana, ou seja, usando a demanda horária dos cinco dias com os maiores valores de carga em cada semana. O segundo representará os

finais de semana (com base nos dois dias com os menores valores de carga em cada semana);

- Mapeamento de horas do dia para blocos de *commitment*.

A calculadora gera os arquivos de dados de entrada do OptGen contendo essas informações, o que é obrigatório para executar a estratégia de solução “OptGen 2” com resolução horária.

5 PARÂMETROS DO MODELO

Os dados descritos nas seções a seguir estão associados à seleção e especificação de parâmetros gerais do modelo para realizar um estudo de planejamento da expansão.

5.1 Opções de estudo

Em primeiro lugar, é muito importante ressaltar que, ao executar o OptGen, independentemente da estratégia de solução aplicada, duas tarefas serão executadas automaticamente pelo modelo:

- **Tarefa 1 – Planejamento da expansão:** na qual o modelo avalia as alternativas de expansão para encontrar o plano de expansão ótimo com base na minimização do investimento mais o valor esperado dos custos operativos;
- **Tarefa 2 - Simulação do plano de expansão:** depois de encontrar o plano de expansão ótimo na Tarefa 1, o OptGen executa automaticamente o modelo SDDP para a otimização final do despacho e impressão de todos os resultados nos arquivos de saída.

As tarefas acima mencionadas correspondem a procedimentos separados que podem ser realizados com diferentes premissas e critérios, de acordo com as opções selecionadas para os modelos de operação e confiabilidade.

5.1.1 Planejamento da expansão

a) Estratégia de solução

O usuário deve selecionar qual abordagem de expansão será aplicada para encontrar o plano de expansão ótimo:

- "OptGen 1": utiliza técnicas de decomposição que permitem o uso do modelo SDDP para avaliação de *trade-off* multiestágio considerando operação hidrotérmica estocástica;
- "OptGen 2": utiliza modelo de operação horário e cenários de vazão/geração renovável para incorporar *unit commitment*, restrições de rampa e reserva probabilística de geração.

Para mais detalhes sobre as abordagens "OptGen 1" e "OptGen2", consulte o Manual de Metodologia.

b) Modelo de operação

A seleção do modelo de operação está relacionada ao tipo de representação de incerteza:

- "SDDP": o modelo SDDP usa os parâmetros estocásticos especificados para calcular uma política operativa que é então simulada para um conjunto de cenários. Para mais detalhes sobre o algoritmo e parâmetros do SDDP, consulte a Metodologia e os Manuais do Usuário do SDDP.
- "Cenários": o modelo de operação utiliza cenários multi-determinísticos para as vazões hidrológicas, geração de energia renovável e outras fontes de incertezas. Para as vazões, especificamente, o usuário é capaz de definir o conjunto de cenários e suas probabilidades de ocorrência na tela "Cenários de vazão" do OptGen. Nesse caso, nenhuma política operativa é calculada pelo algoritmo SDDP.

Quando a estratégia de solução selecionada pelo usuário é o “OptGen 1”, o procedimento de decomposição separa as decisões de investimento e operação, permitindo ao usuário selecionar o modelo operativo como multi-determinístico (através da representação de cenários e probabilidades) ou estocástico (execução completa do SDDP).

Quando a estratégia de solução é o “OptGen 2”, a opção “Cenários” é a única disponível, já que a abordagem considera um modelo de operação multi-determinístico integrado, onde investimento e operação são co-otimizados dentro do mesmo problema de otimização.

c) Modelo de confiabilidade

- “Coral”: essa opção permite considerar as restrições de segurança na tarefa de planejamento usando o modelo Coral para avaliar a confiabilidade do sistema durante o procedimento de decomposição do OptGen. Por esse motivo, essa opção só está disponível quando a estratégia da solução selecionada é “OptGen 1”. Para obter mais detalhes sobre algoritmo e parâmetros, consulte os manuais do Usuário e de Metodologia do Coral.

Além de todos os dados de entrada necessários para executar o Coral, quando o modelo de confiabilidade é selecionado, um critério de segurança em termos da máxima potência esperada não suprida (EPNS - *Expected Power Not Supplied*) deve ser definido pelo usuário. Para mais informações, consulte a seção “Parâmetros de confiabilidade".

d) Resiliência (Cenários críticos)

- Essa opção permite considerar eventos de baixa probabilidade e alto impacto durante a fase de planejamento da expansão. Isso é feito através do procedimento de decomposição adotado pelo OptGen onde cortes de viabilidade para o plano de expansão ótimo são obtidos resolvendo problemas de despacho que minimizam o déficit de energia sob condições extremas e sub-horizontes pré-definidos. Esta opção está disponível somente quando a estratégia de solução “OptGen 1” estiver selecionada.

5.1.2 Simulação do plano de expansão

Como explicado no início deste capítulo, depois de encontrar o plano de expansão ótimo na Tarefa 1, o OptGen executa automaticamente o modelo SDDP para a otimização final de despacho e impressão dos resultados de investimento e operação nos arquivos de saída, independentemente da estratégia da solução e outras opções de planejamento da expansão que o usuário tenha selecionado.

a) Modelo de operação

Seleção do modelo operativo, “Cenários” ou “SDDP”, para obter os resultados operativos levando em conta o plano ótimo de expansão. Ambas as abordagens estão explicadas na seção “Planejamento da expansão".

b) Modelo de confiabilidade

Ao ativar esta opção, uma análise de confiabilidade é realizada para calcular os índices de confiabilidade do sistema considerando o plano de expansão ótimo, ou seja, este é apenas um pós-processamento que não afeta o processo de tomada de decisão de investimento dos projetos (como acontece quando o usuário contempla critério de confiabilidade na tarefa de planejamento da expansão).

5.1.3 Parâmetros gerais

a) Ano inicial, ano final e número de anos

Esses três campos devem ser usados para definir o horizonte de estudo. O usuário deve sempre definir o “Ano inicial”. Depois disso, ele pode definir o "Ano final" ou o "Número de anos" (com um dos campos, o outro é atualizado automaticamente).

b) Etapa de investimento

Seleção do intervalo de tempo para decisões de investimento que podem ser anuais, semestrais, trimestrais ou mensais. Para a grande maioria dos estudos de expansão de longo prazo, o investimento anual é geralmente suficiente. A necessidade de aumentar a granularidade das etapas de investimento deve ser avaliada em detalhe pelo usuário.

c) Etapa de operação

Este campo mostra o intervalo de tempo para decisões operativas que podem ser mensais ou semanais, e essa informação provém dos dados do SDDP. Na tela “Opções de estudo” do SDDP, o usuário também pode selecionar “Representação horária” dos resultados da simulação operativa.

d) Blocos de demanda

Este campo mostra o número de blocos de demanda definido nos dados SDDP.

e) Taxa de desconto (%)

Este campo define a taxa de interesse anual usada para calcular o valor presente dos fluxos de caixa futuros. Para calcular o custo de investimento anualizado, o usuário pode optar por especificar taxas de desconto individuais para cada projeto na tela "Dados do projeto". Caso contrário, o modelo considerará o valor informado neste campo.

5.1.4 Leitura de plano de expansão

Esse recurso permite que o usuário conduza diferentes tipos de estudos de planejamento, dependendo do nível de flexibilidade dado ao modelo de otimização em termos de decisões de expansão informadas por um Plano de expansão definido pelo usuário:

- Manual: o usuário define um plano de expansão fixo contendo todos os projetos que serão construídos e suas datas e valores de decisão associados. Essa opção é usada para simular investimentos e custos de operação mínimos para o plano de expansão selecionado.
- Semiautomático: o usuário define um plano de expansão parcial contendo projetos fixos e/ou flexíveis que devem ser construídos, e permite que o modelo de otimização complemente o plano de expansão com projetos adicionais, se necessário.
- Automático: nenhum plano de expansão definido anteriormente é considerado e o modelo otimiza todas as decisões de expansão.

Assim, o usuário pode escolher um arquivo de plano de expansão no diretório de dados (modos manual ou semiautomático) ou não escolher nenhum plano e deixar o modelo funcionar no modo automático.

5.1.5 Parâmetros de confiabilidade

a) Máxima EPNS

Representa a máxima potência esperada não suprida em termos de p.u. da demanda na restrição de segurança. Essas informações são usadas quando o modelo de confiabilidade é selecionado como critério de planejamento. Para mais informações sobre a EPNS, consulte o manual de metodologia do Coral.

5.2 Seleções

5.2.1 Projetos

Essa tela permite ao usuário selecionar quais projetos devem ser considerados pelo modelo como opções candidatas ao plano de expansão.

5.2.2 Restrições

Essa tela permite ao usuário selecionar quais restrições adicionais mínimas e máximas devem ser consideradas pelo modelo durante o processo de otimização do planejamento da expansão.

5.2.3 Cenários de vazão

Quando o usuário seleciona “Cenários” como modelo de operação para o planejamento da expansão ou para a tarefa de simulação do plano de expansão, essa aba permite ao usuário selecionar quais cenários de hidrologia devem ser considerados e suas probabilidades de ocorrência associadas. O modelo resolverá problemas operativos multi-determinísticos para todos os cenários e calculará a solução média ponderada por suas probabilidades. Consulte a seção Cenários de vazão para obter mais detalhes sobre como criar esses cenários.

5.2.4 Cenários críticos

Quando o usuário seleciona “Resiliência (Cenários Críticos)” nas opções de planejamento da expansão, esta aba permite selecionar quais grupos de sensibilidades, definidos nos dados do SDDP, devem ser considerados como cenários críticos nos problemas de viabilidade resolvidos pelo módulo de resiliência. Além disso, o ano inicial, o número de anos e o número da série *forward* do SDDP são informados para cada cenário. O modelo resolverá problemas operativos multideterminísticos que minimizam o déficit para cada cenário. Se o déficit for maior que zero, a solução do problema é utilizada para construir um novo corte de viabilidade para o problema de expansão, resultando na eliminação do plano de expansão correspondente, e incorporando, dessa forma, o critério de resiliência na busca pelo melhor plano de expansão para o sistema.

5.3 Opções de execução

Tradicionalmente, o modelo OptGen resolve um problema para obter o *timing* da expansão, ou as datas de decisão para entrada em operação dos projetos ao longo do horizonte de estudo. Dependendo do número de projetos considerados e do tamanho do horizonte de estudo, o

problema de encontrar o plano de expansão ótimo pode ser muito complexo devido à natureza combinatória do conjunto de soluções viáveis.

Por exemplo, considerando um horizonte de estudo de apenas 1 ano e um conjunto de 3 projetos candidatos com variável de decisão binária, o número de planos de expansão possíveis é $2^3 = 8$, como segue:

Planos de Expansão	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5	Plano 6	Plano 7	Plano 8
P1		X		X		X		X
P2			X	X			X	X
P3					X	X	X	X

Em termos gerais, o número de planos de expansão possíveis cresce exponencialmente com o número de anos e projetos binários. Para um caso de estudo com X anos e Y projetos, esse número é 2^{X*Y}.

A definição do horizonte de estudo é uma tarefa importante, pois o planejamento da expansão pode ser ineficaz com horizonte muito pequeno, devido ao efeito do tempo de construção dos projetos e economias de escala, por exemplo. Por outro lado, quanto mais longos os horizontes, menores os efeitos das decisões tomadas nos últimos anos do estudo devido à taxa de desconto. Isso é conhecido como efeito de fim do horizonte e pode levar a uma estratégia de planejamento ruim nos últimos anos.

As estratégias de solução **Ano Horizonte** e **Horizonte Rolante** podem ser aplicadas ao problema de planejamento para reduzir o tempo computacional gasto para alcançar um plano de expansão de menor custo e minimizar os efeitos de fim do horizonte para um planejamento de longo prazo.

A estratégia Ano Horizonte é baseada em um procedimento de duas fases. Na primeira fase, o modelo resolve um problema de *sizing* (dimensionamento) para encontrar os projetos que devem pertencer ao sistema no Ano Horizonte. Usando a solução desse problema, o modelo resolve o problema de *timing* selecionando automaticamente essa lista restrita de projetos para serem considerados como opções de expansão. Em outras palavras, o problema de dimensionamento decide **quais** projetos devem ser construídos e o problema de *timing* decide **quando** eles devem ser construídos.

A estratégia de Horizonte Rolante é usada para resolver o problema de *timing* e consiste na solução encadeada de problemas de expansão obtidos pela divisão do horizonte de estudo em sub-horizontes menores. É importante notar que a estratégia de solução “OptGen 2” sempre usa a heurística do Horizonte Rolante, dividindo automaticamente o horizonte em sub-horizontes de 1 ano. Para mais detalhes sobre a metodologia “OptGen 2”, consulte o Manual de Metodologia.

5.3.1 Usar ano horizonte

Ao selecionar essa opção, o modelo executa a solução do problema de *sizing* considerando a configuração estática do **ano horizonte**, que é fixada para o **número de anos** especificado pelo usuário. Este procedimento pode também ser feito de forma incremental, definindo os anos

horizontes intermediários e seus respectivos **número de anos** fixos. A solução desses problemas de *sizing* é usada para reduzir a lista de projetos candidatos que serão considerados no problema de decisão de *timing*.

Por exemplo, vamos supor um horizonte de estudo de 2021-2040, um conjunto de 100 projetos candidatos e a seleção da opção "Usar ano horizonte" para 2 problemas de *sizing* da seguinte forma:

- Ano horizonte 2030, 5 anos
- Ano horizonte 2040, 5 anos

Em seguida, o modelo executa automaticamente a tarefa de planejamento da expansão em 3 passos:

1. Resolve um problema de expansão de 5 anos com configuração estática do ano 2030, considerando a lista de projetos candidatos original.
2. Soluciona um problema de expansão de 5 anos com configuração estática do ano 2040, considerando o plano de expansão obtido a partir do passo 1 como um plano complementar, onde o modelo incluirá, se necessário, novas decisões de expansão de projetos da lista de candidatos original.
3. Suponhamos que o plano de expansão resultante obtido nas etapas 1 e 2 contém 20 projetos da lista original de 100 candidatos, então o modelo resolve o caso original 2021-2040 considerando apenas os 20 projetos como candidatos para as decisões de *timing*.

5.3.2 Usar horizonte rolante

Por *default*, o problema de *timing* é resolvido para todo o horizonte de estudo. Ao selecionar essa opção, o usuário pode informar o particionamento do horizonte, que permite ao modelo encadear as soluções de expansão de problemas de sub-horizontais menores. Ao definir o **ano inicial** e o **número de anos** de cada sub-horizonte, o modelo mantém automaticamente as decisões tomadas nos anos anteriores ao ano inicial de cada novo sub-horizonte. No final, o modelo simula o plano de expansão para gerar resultados para todo o horizonte do estudo.

Por exemplo, vamos supor um horizonte de estudo de 2021-2040 e a seleção da opção "Usar horizonte de rolamento" para 3 problemas de *timing* da seguinte forma:

- Ano inicial 2021, 10 anos
- Ano inicial 2026, 10 anos
- Ano inicial 2031, 10 anos

Em seguida, o modelo executará automaticamente a tarefa de planejamento da expansão em 4 etapas:

1. Resolve o problema de expansão 2021-2030.
2. Resolve o problema de expansão 2026-2035, considerando as decisões de expansão obtidas no passo 1 para os anos 2021-2025 como um plano complementar.
3. Resolve o problema de expansão 2031-2040, considerando as decisões de expansão obtidas no passo 1 para os anos 2021-2025 e no passo 2 para os anos 2026-2030 como um plano complementar.
4. Resolve uma simulação do plano de expansão, considerando as decisões obtidas nos passos anteriores para todo o horizonte de estudo como um plano fixo.

5.3.3 Parâmetros do modelo

Os parâmetros do modelo são definidos independentemente para os problemas de *sizing* e *timing* e são diferentes para as estratégias OptGen 1 e OptGen 2.

5.3.3.1 Parâmetros do OptGen 1

a) Reiniciar

Ao selecionar "Sim", esta opção permite ao usuário reiniciar o modelo de otimização considerando a melhor solução encontrada em uma execução anterior. Neste caso, o OptGen resolve o problema de investimento para melhor plano da rodada original para checar a viabilidade. Se este plano for viável para a rodada reiniciada (esta nova após o *restart*), o OptGen executa o modelo de operação para a melhor solução da rodada anterior e recalcula/atualiza o limite superior (*upper bound*) antes de executar as novas iterações do modelo de investimento. Caso o melhor plano da rodada anterior não seja viável, o OptGen apenas aproveita os cortes de Benders anteriores e busca uma nova solução.

Observe que a aplicação mais comum para esta opção de reinicialização é para encontrar uma solução de expansão de menor custo com um *gap* de convergência mais estreito, mesmo sem nenhuma alteração nos dados de entrada do caso.

Agora, se antes da reinicialização do caso, o usuário decide alterar alguns dados do problema de investimento, como por exemplo, incluir restrições de segurança no procedimento de planejamento, ou aumentar o custo de investimento de algum projeto, pode ser que estas alterações façam com que o plano de expansão ótimo da nova rodada seja mais caro do que o melhor plano obtido na execução original, porém, de qualquer maneira, ao utilizar esta opção de reinicialização, os cortes foram aproveitados e isto pode acelerar o processo de convergência deste caso, economizando tempo de processamento até a obtenção da solução ótima.

b) Número mínimo de iterações

Representa o número mínimo de iterações de decomposição de Benders que serão executadas pelo modelo antes de aplicar qualquer critério de parada.

c) Número máximo de iterações

Critério de parada para a estratégia de decomposição, representa o número máximo de iterações de decomposição de Benders.

d) Tolerância de convergência (%)

Critério de parada para a estratégia de decomposição, representa a tolerância mínima para o *gap* relativo calculado a partir do limite superior e inferior em cada iteração da decomposição de Benders. Está relacionado à integração entre os módulos de operação e investimento.

e) Tolerância de convergência MIP (%)

Critério de parada para o MIP (*mixed integer problem*), representa a tolerância de convergência do algoritmo de *branch-and-bound* que é utilizado para resolver cada problema de investimento.

f) Limite de tempo para MIP (s)

Critério de parada para problemas MIP, representa o tempo máximo de CPU para o algoritmo de *branch-and-bound*.

g) Usar iterações consecutivas

Esta opção é uma estratégia de convergência que fixa decisões de investimento de projetos que têm sua solução repetida para o número de iterações consecutivas selecionadas pelo usuário (N). Ou seja, se o modelo optar por não investir em um determinado projeto por pelo menos N iterações consecutivas, a decisão de não investir nesse projeto será fixada. O mesmo acontece com projetos que têm a mesma decisão de investimento para esse número de iterações consecutivas. Quando a lógica OU (OR) é utilizada (que se refere a deixar a opção ativa), as repetições são contadas quando pelo menos um dos critérios a seguir é atendido:

- Número total de iterações é maior ou igual a um valor específico; ou
- *Gap* de convergência é menor ou igual a um valor específico.

Por exemplo, vamos considerar os seguintes parâmetros:

a) Número de repetições (iterações consecutivas): 2
b) Número da iteração ≥ 3
c) *Gap* de convergência $\leq 15\%$
d) 3 projetos com decisão binária
e) Os seguintes *gaps* de convergência / decisão de investimento para as primeiras 5 iterações:

Iteração	gap (%)	Projeto 1 (%)	Projeto 2 (%)	Projeto 3 (%)
1	100	0	0	0
2	90	0	100	100
3	70	0	100	0
4	40	100	100	0
5	15	0	100 (fixo)	0 (fixo)

Como o valor do *gap* necessário para fixar decisões é atingido apenas na iteração 5, o critério que ativa essa estratégia é o número mínimo de iterações (3). A partir da iteração 3, o modelo começa a contabilizar as decisões de investimento e as repetições são reiniciadas para 1 quando a decisão de investimento muda de uma iteração para outra. Podemos ver que, na iteração 5, o Projeto 1 não é fixado porque o OptGen alterou sua decisão de investimento da iteração 3 para 4. As decisões do Projeto 2 e 3 são fixadas porque suas decisões de investimento são repetidas nas iterações 3 e 4.

Quando a lógica E (AND) é utilizada (que se refere a deixar a opção ativa), as repetições são contadas quando os dois critérios são atendidos.

Essa estratégia é destinada a ajudar a convergência geralmente quando o *gap* está próximo da tolerância. Se esta opção for mal utilizada, por exemplo, ao definir um pequeno número de iterações

consecutivas para fixar soluções, especialmente quando o *gap* de convergência ainda é muito grande, o modelo pode tomar decisões para fixar os projetos que provavelmente não seriam parte da solução ótima. Em termos de convergência do modelo, às vezes pode-se observar um *gap* negativo nesses casos.

5.3.3.2 Parâmetros do OptGen 2

a) Tolerância de convergência (%)

Como o OptGen 2 co-otimiza os problemas de investimento e operação no mesmo modelo de otimização, a tolerância de convergência é a tolerância do MIP do processo de solução. Essa tolerância é a diferença entre a melhor solução binária viável e a solução linear ótima (que é inviável porque as variáveis são binárias e não lineares). Portanto, por exemplo, se o usuário estiver executando um caso sem quaisquer variáveis binárias (*unit commitment*, variável de investimento binária ou inteira), então a tolerância de convergência não será utilizada, uma vez que a solução linear ótima também é uma solução viável.

b) Limite de tempo (s)

Esse parâmetro limita o tempo total de execução do OptGen 2. Por exemplo, se um caso tiver 5 anos e o tempo limite for 300 s, então o OptGen 2 terá 300 s para resolver todos os 5 anos. Se o tempo limite for atingido, uma solução parcial estará disponível.

6 MÓDULO GRAFICADOR

6.1 Introdução

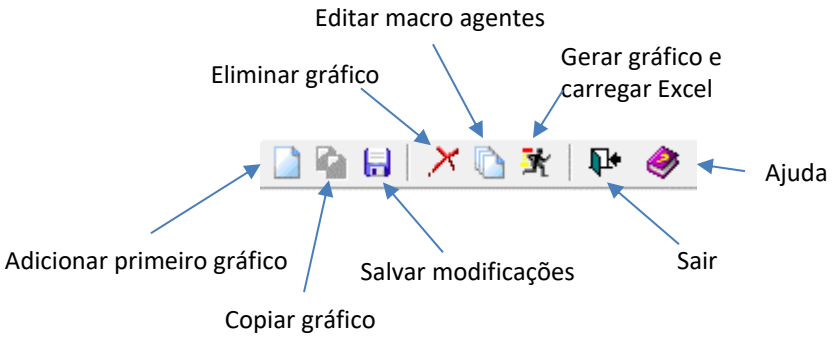
O módulo graficador permite ao usuário visualizar graficamente a maioria dos resultados de saída gerados pelos modelos OptGen e SDDP. Para acessar este módulo, clique no botão correspondente na barra de menu do OptGen:

A tela do módulo graficador é dividida da seguinte forma:

- Opções gerais
- Seleção de etapas
- Seleção de blocos
- Seleção de séries
- Título dos eixos
- Seleção de variáveis, agentes e macro agentes

Depois de configurar todos os parâmetros, o botão “Executar” gera gráficos formatados do Excel.

6.2 Opções gerais



a) Criando o primeiro gráfico

Se nenhum gráfico tiver sido definido até o momento, use o botão “Adicionar” para criar um novo gráfico. Digite o nome do gráfico e pressione "Ok".

b) Selecionando um gráfico

Use a *combo box* localizada na parte superior da tela para selecionar um gráfico para visualização e edição.

c) Copiando gráficos

Use o botão “Copiar” para gerar um novo gráfico a partir de outro previamente definido. Digite o nome do novo gráfico e pressione "Ok".

d) Eliminando gráficos

Use o botão "Eliminar" para selecionar os gráficos que serão removidos da base de dados.

e) Manipulação de macro agentes

Use o botão “Editor de Macro agentes” para gerenciar macro agentes, que são definidos como a soma ponderada de um conjunto de agentes. Use os botões "Eliminar" ou "Editar" para remover ou modificar um macro agente selecionado. Use o botão “Adicionar” para criar um novo macro agente: informe o nome do macro agente, a variável associada e selecione os agentes que serão somados com seus coeficientes especificados (pesos).

Por exemplo, pode-se definir um macro agente chamado HydroX que contém a soma das gerações de todas as usinas hidrelétricas da empresa X. Macro agentes padrões também estão disponíveis, tais como: TotalHydro (todas as usinas hidrelétricas), Exist.Hydro (todas as usinas hidrelétricas existentes), etc.

6.3 Seleção de etapas

Permite que o usuário especifique o intervalo de datas de interesse, dentro do horizonte de estudo, para gerar o gráfico.

6.4 Seleção de blocos

Permite que o usuário selecione os blocos de interesse, pressionando o número de cada bloco.

Além disso, o usuário pode agregar valores de um gráfico configurando as opções para somar valores por bloco e somar valores por ano.

6.5 Seleção de séries

Permite que o usuário selecione todos os cenários ou um subconjunto de cenários de interesse.

Além disso, o usuário pode definir diferentes tipos de quantís para estas séries:

- Grafica séries: grafica o valor individual para cada série selecionada.
- Grafica média: grafica o valor médio das séries selecionadas.
- Grafica desvio padrão: grafica o desvio padrão das séries selecionadas.
- Grafica quantil superior: grafica o quantil superior de x%, isto é, o valor Qx tal que P(Q<Qx) = x/100, onde Q é a variável selecionada.
- Grafica quantil inferior: grafica o quantil inferior de x%, isto é, o valor Qx tal que P (Q>Qx) = x/100, onde Q é a variável selecionada.

6.6 Título dos eixos (opcional)

Representa os identificadores para o eixo X, eixo Y e eixo secundário.

6.7 Seleção de variáveis, agentes e macro agentes

As variáveis são os resultados obtidos a partir da execução do modelo e estão associadas aos arquivos de saída em planilha. Os agentes são as entidades associadas aos resultados de saída. Por exemplo, a “Capacidade Instalada Hidro” é uma variável que se aplica aos agentes usinas hidrelétricas.

Ao pressionar o botão “Variáveis”, na tela principal, uma nova janela aparece. Selecione e descarte as variáveis da lista “Selected Variables” usando os botões (<<) e (>>). O mesmo procedimento se aplica à seleção de agentes e agentes macro. Para selecionar todas as variáveis na lista, pode-se selecionar a primeira variável e pressionar as teclas “Shift” e ↓ no teclado.

6.8 Filtros

A ferramenta de filtro está localizada na janela de seleção de agentes e permite que o usuário especifique expressões lógicas sobre atributos de agentes para ajudar a selecionar um subconjunto de interesse.

Ao pressionar o botão “Filtros”, uma nova janela aparece onde operadores e atributos podem ser combinados como expressões lógicas sofisticadas para construir um filtro desejado.

1. Selecione um atributo.
2. Selecione o tipo de restrição (entre, igual a, etc.)
3. Defina o valor da restrição
4. Pressione o botão “Adicionar”
5. Use parênteses e operadores lógicos para combinar restrições.
6. Use o botão “Limpar” para eliminar toda a expressão

7 ARQUIVOS DE SAÍDA DO MODELO

7.1 Arquivos de saída em planilhas

Estes são os arquivos de saída que podem ser manipulados pelo módulo graficador.

Palavras-chaves para a tabela de descrição de saídas em planilha

Tipo	Descrição
DE	Dados de entrada
DI	Decisões de investimento

Agente	Descrição
H	Hidrelétricas
T	Térmicas
R	Renováveis
S	Sistemas
I	Interconexões
F	Combustíveis
P	Projetos

Para gerar o gráfico desejado, o usuário deve selecionar no módulo graficador a variável correspondente.

Além de todas as saídas operativas geradas pelo modelo SDDP, esses são os arquivos de saída gerados pelo modelo OptGen:

Gráfico	Nome do arquivo CSV	Agente	Unidade	Tipo
Capacidade investida	outidec.csv	P	MW	DI
Custo de investimento (CAPEX)	outdcinv.csv	P	k$	DI
Custo de O&M fixo	outdcoem.csv	P	k$	DI
Custo de investimento + O&M fixo	outdisbu.csv	P	k$	DI
Custo de investimento total	outdbtot.csv	P	k$	DI
Energia firme hidro	outhea.csv	H	MWm	DE
Potência firme hidro	outhpa.csv	H	MW	DE
Energia firme térmica	outtea.csv	T	MWm	DE
Potência firme térmica	outtpa.csv	T	MW	DE
Energia firme renovável	outrea.csv	R	MWm	DE
Potência firme renovável	outrpa.csv	R	MW	DE

7.2 Arquivos de saída adicionais

Todos os arquivos apresentados nesta seção podem ser acessados pela interface, no botão "Relatórios", no menu superior da tela principal.

7.2.1 Relatório de execução

O arquivo de relatório de execução (optgen.out) possui os seguintes conjuntos de dados de saída:

- Resumo dos dados de entrada
- Custos de investimento anualizados
- Relatórios de geração e transmissão
- Relatório de convergência
- Plano de expansão ótimo
- Custos totais
- Tempo de CPU necessário para a optimização

7.2.2 Plano de expansão ótimo

O arquivo outpdec.csv representa o plano de expansão ótimo para o caso de estudo atual. Esse arquivo tem a forma exata de um plano de expansão definido pelo usuário e pode ser usado como um dado de entrada. A primeira linha contém a versão do arquivo, a segunda linha é um cabeçalho e a terceira linha contém o tipo do plano. Nesse arquivo, o tipo do plano é sempre "*exactly*" – consulte a seção "Plano de expansão definido pelo usuário" para obter detalhes sobre os tipos de plano.

A quarta linha também é um cabeçalho e as linhas seguintes contêm os registros descritos abaixo:

Campo	Descrição
1	Data de entrada operação (mês)
2	Data de entrada em operação (ano)
3	Data de decisão de investimento (mês)
4	Data de decisão de investimento (ano)
5	Código do projeto
6	Nome do projeto
7	Tipo do projeto: 0 = usina térmica 1 = usina hidrelétrica 2 = interconexão 3 = nó de gás 4 = gasoduto 5 = circuito 6 = fonte renovável 7 = elo CC 8 = bateria 9 = barra CA 10 = linha de transmissão em CA 11 = transformador 12 = transformador de três enrolamentos 13 = capacitor série chaveável

	14 = barra CC 15 = linha de transmissão em CC 16 = conversor LCC 17= conversor P2P 18 = conversor VSC 19 = equipamento shunt 22 = CSP 23 = Produtor (Eletrificação/Hidrogênio) 24 = Transporte (Eletrificação/Hidrogênio) 25 = Armazenamento (Eletrificação/Hidrogênio) 999 = N/I
8	Capacidade adicionada (MW)
9	Chave: exactly = valor de decisão exato;
10	Tipo de decisão: -1 = decisão planejada fixa -2 = decisão otimizada -3 = decisão planejada flexível
11	Decisão do projeto em p.u. da capacidade instalada (acumulada em caso de variáveis contínua ou inteira)

Além do plano de expansão ótimo, o modelo OptGen também gera um arquivo para o plano de expansão de cada iteração. Esses arquivos não são acessados pela interface do modelo, mas podem ser encontrados no diretório de dados do caso de estudo e são identificados como outpdec_XXXXYYY.csv, onde XXXX é o número da iteração e YYY é a identificação do problema de *sizing* ou *timing*.

7.2.3 Plano de expansão detalhado

O plano de expansão detalhado pode ser encontrado no arquivo optsol01.csv. Seus registros são apresentados no seguinte formato:

Campo	**Descrição**
1	Data de entrada em operação
2	F = se a data de entrada for fixa R = se a unidade existente for substituída
3	> = se a data de entrada for a data máxima <= se a data de entrada for a data mínima * = se a data de entrada for única
4	Tipo de projeto: TPP = usina térmica HPP = usina hidrelétrica INT = interconexão GAS = nó de gás GPL = gasoduto CIR = circuito RNW = fonte renovável DCL = Elo CC BAT = bateria BUS = barra CA

	LIN = linha de transmissão em CA TRF = transformador TR3 = transformador de três enrolamentos SSC = capacitor série chaveável DCB = barra CC DCL = linha de transmissão de CC CNV = conversor LCC P2P= conversor P2P VSC = conversor VSC SHT = equipamento shunt CSP = CSP EPD = Produtor (Eletrificação/Hidrogênio) ETR = Transporte (Eletrificação/Hidrogênio) EST = Armazenamento (Eletrificação/Hidrogênio) N/I = N/I
5	Sistema
6	Nome do projeto
7	Decisão de investimento (%)
8	Capacidade adicionada (MW)

7.2.4 Relatório de convergência

O arquivo optgconv.csv contém o relatório de convergência do OptGen e consiste nas seguintes colunas:

- Caractere "*" identifica que uma solução melhor foi encontrada e o limite superior é atualizado
- Caractere "B" identifica que a solução MIP foi interrompida por limite de tempo de CPU
- Custo de investimento (M$)
- Custo aproximado de operação (M$)
- Custo esperado de operação (M$)
- Custo total (M $)
- Limite inferior (Custo de investimento + custo aproximado de operação) (M$)
- Limite superior (Custo de investimento + custo esperado de operação) (M$)
- *Gap* de convergência (diferença percentual entre os limites superior e inferior) (%)
- Tolerância de convergência (%)
- Tempo de CPU do problema de investimento (min)
- Tempo de CPU do problema de operação (min)
- Inviabilidade da restrição de segurança (GWh)
- Critério de confiabilidade (máximo EPNS) (%)
- EPNS da melhor solução (%)
- Tempo de CPU do problema de confiabilidade (min)
- Número de iterações do SDDP
- Limite superior do SDDP (M$)
- Limite inferior do SDDP (M$)
- *Gap* de convergência do SDDP (M$)
- Tolerância de convergência do SDDP (M$ ou %)

Se as estratégias de ano horizonte ou horizonte rolante (consulte "Opções de execução") estiverem selecionadas, esse relatório conterá a convergência de execução de cada subproblema.

7.2.5 Valor de CAPEX da expansão ótima

O arquivo outcapex.csv contém o valor de CAPEX não descontado (em k$) de cada projeto no final de cada ano, quando realmente ocorre o pagamento. A primeira linha contém o cabeçalho do arquivo, com os nomes das colunas. A partir da segunda linha, os dados são impressos no seguinte formato: a primeira coluna contém um ano do estudo e as demais colunas contêm os valores CAPEX de cada projeto para esse ano específico.

7.2.6 Valor de O&M fixo da expansão ótima

O arquivo outcoem.csv contém o valor de O&M fixo não descontado (em k$) de cada projeto no final de cada ano, quando realmente ocorre o pagamento. O custo de O&M é fixo, isto é, depende apenas da quantidade de capacidade investida no projeto. A primeira linha contém o cabeçalho do arquivo, com os nomes das colunas. A partir da segunda linha, os dados são impressos no seguinte formato: a primeira coluna contém um ano do estudo e as demais colunas contêm os valores de O&M de cada projeto para esse ano específico.

7.2.7 Custo médio de longo prazo (LRAC)

O arquivo outlrac.csv contém os valores de custo médio de longo prazo (LRAC) do sistema (em $/MWh). Para cada ano, o OptGen calcula o LRAC (em $/MWh) da seguinte maneira:

$$LRAC_t = \frac{\sum_{i=1}^{\min(\tau, T-t)} TC_{t+i-1} / {tx_a}^{i-1}}{\sum_{i=1}^{(\tau, T-t)} TD_{t+i-1} / {tx_a}^{i-1}}, \qquad t = 1, \dots, T$$

onde:

TC_t	Custo total anual (investimento + operação)	$
TD_t	Demanda total anual	MWh
τ	Período de amortização[1]	Anos
T	Horizonte do estudo	Anos
tx_a	Taxa de desconto anual	p.u.

Como exemplo, favor considerar os seguintes dados:

- Horizonte do estudo (T): 10 anos
- Período de amortização (τ): anos.

Agora, apliquemos o seguinte procedimento:

1. Pegue os custos de investimento + operação de cada mês do primeiro ano e traga-os para janeiro do ano 1. Vamos chamar a soma destes valores de TC1;
2. Pegue os custos de investimento + operação de cada mês do segundo ano e traga-os para janeiro do ano 2. Vamos chamar a soma destes valores de TC2;

[1] O valor *default* do período de amortização é de 5 anos. Apesar de não estar na interface do OptGen, este valor pode ser alterado, e caso o usuário tenha interesse, favor entrar em contato conosco: optgen@psr-inc.com.

Neste exemplo de caso, o primeiro LRAC(1), referente ao primeiro ano, será calculado da seguinte forma:

$$LRAC_{(1)} = \frac{\frac{(TC1)}{(tx_a{}^0)} + \frac{(TC2)}{(tx_a{}^1)}}{\frac{(TD1)}{(tx_a{}^0)} + \frac{(TD2)}{(tx_a{}^1)}}$$

En resumen, el LRAC se calcula básicamente como la siguiente relación: valor presente neto de **(costos de inversión + operación) / (demanda)** durante el período de amortización. Las tasas de descuento anuales se aplican para llevar los valores futuros enero del año 1.

Em resumo, o LRAC é calculado basicamente pela seguinte razão: valor presente líquido de **(custos de investimento + operação) / (demanda)** dos anos que fazem parte do período de amortização. As taxas de desconto anuais são aplicadas para levar os valores futuros para janeiro do ano 1.

7.2.8 Custo marginal de longo prazo (LRMC)

O arquivo outlrmc.csv contém os valores de custo marginal de longo prazo (LRMC) do sistema (em $/MWh). Para cada ano, o OptGen calcula o LRMC ($/MWh) da seguinte maneira:

$$LRMC_t = \frac{\sum_{i=1}^{\min(\tau, T-t)} (TC_{t+i} - TC_{t+i-1})/(tx_a{}^i)}{\sum_{i=1}^{\min(\tau, T-t)} (TD_{t+i} - TD_{t+i-1})/(tx_a{}^i)}, \qquad t = 1, \dots, T-1$$

onde:

TC_t	Custo total anual (investimento + operação)	$
TD_t	Demanda total anual	MWh
τ	Período de amortização[1]	Anos
T	Horizonte do estudo	Anos
tx_a	Taxa de desconto anual	p.u.

Como exemplo, favor considerar os seguintes dados:

- Horizonte do estudo (T): 10 anos
- Período de amortização (τ): anos.

Agora, apliquemos o seguinte procedimento:

1. Pegue os custos de investimento + operação de cada mês do primeiro ano e traga-os para janeiro do ano 1. Vamos chamar a soma destes valores de TC1;
2. Pegue os custos de investimento + operação de cada mês do segundo ano e traga-os para janeiro do ano 2. Vamos chamar a soma destes valores de TC2;
3. Pegue os custos de investimento + operação de cada mês do terceiro ano e traga-os para janeiro do ano 3. Vamos chamar a soma destes valores de TC3;

Neste exemplo de caso, o primeiro LRMC(1), referente ao primeiro ano, será calculado da seguinte forma:

[1] O valor *default* do período de amortização é de 5 anos. Apesar de não estar na interface do OptGen, este valor pode ser alterado, e caso o usuário tenha interesse, favor entrar em contato conosco: optgen@psr-inc.com.

$$LRMC_{(1)} = \frac{\frac{(TC2 - TC1)}{(tx_a{}^1)} + \frac{(TC3 - TC2)}{(tx_a{}^2)}}{\frac{TD2 - TD1}{(tx_a{}^1)} + \frac{TD3 - TD2}{(tx_a{}^2)}}$$

Em resumo, o LRMC é calculado basicamente pela seguinte razão: valor presente líquido de **(delta [custos de investimento + operação]) / delta [demanda]** dos anos que fazem parte do período de amortização. As taxas de desconto anuais são aplicadas para levar os valores futuros para janeiro do ano 1.