

RecoVR

Manual do Usuário

www.vrtech.com.br



24 de fevereiro de 2010

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Introdução ao RecoVR	2
1.2	Importância do Gerenciamento Adequado dos Recursos Hídricos Industriais	2
1.3	Tecnologia	3
1.4	Instalação	3
1.4.1	Controle de Uso	3
1.4.2	Instalando RecoVR no Windows	4
1.4.3	Resolução de Problemas de Instalação	4
2	Visão Geral	6
2.1	Abrindo o RecoVR	7
3	Equipamentos e Correntes	12
3.1	Detalhes dos equipamentos	14
3.2	Propriedades dos equipamentos	15
3.3	Conectando equipamentos	20
3.4	Modelando equipamentos	22
3.5	Modelos matemáticos internos	25
4	Simulação e Observabilidade de Diagramas	30
4.1	Observabilidade de Correntes de Processo	31
4.1.1	Exemplo de determinação de observabilidade	31
4.2	Simulação	36
4.2.1	Introdução	36
4.2.2	Conceitos Importantes	37
4.2.3	Executando a simulação	40

5	Reconciliação de dados e Redundância de Medidas	42
5.1	Redundância de Correntes de Processo	43
5.2	Reconciliação de Dados	46
5.2.1	Introdução	46
5.2.2	O que é <i>tecnicamente</i> uma reconciliação de dados	46
5.2.3	Executando a Reconciliação	47
6	Projeto de Redes de Reúso de Água	53
6.1	Introdução	54
6.2	Levantando limites operacionais	55
6.3	O que é <i>tecnicamente</i> um projeto de redes de reúso	57
6.4	Executando o projeto de redes de reúso	58
6.5	Projeto de Redes de Reúso: Dicas	68
6.6	Projeto de Redes de Reúso: Configurações Avançadas	70
7	Opções	74
7.1	Opções Visuais	75
7.2	Motores de cálculo	78
7.2.1	Motor de cálculo de otimização: NLP Solver	79
7.2.2	Motor de cálculo de integração de processos: NLP Mass Solver	83
	Referências Bibliográficas	87
	Índice Remissivo	87

Direitos Autorais

Os direitos autorais deste programa/rotina de computador e documentos associados são propriedade da VRTech Tecnologias Industriais Ltda e são fornecidos mediante um termo de licença que contém restrições de uso.

É proibida a duplicação, distribuição, cópia ou reprodução deste programa/rotina de computador e documentos associados, no todo ou em parte, sob quaisquer formas ou por quaisquer meios (eletrônico, gravação, fotocópia, distribuição na Web e outros), sem permissão expressa da VRTech Tecnologias Industriais Ltda.

(C) 2006-2009 VRTech Tecnologias Industriais Ltda.
Todos os direitos reservados.

RecoVR é uma marca registrada da VRTech Tecnologias Industriais Ltda. Quaisquer outras marcas, registradas ou não, mencionadas nesta documentação são de propriedade dos seus respectivos titulares. Todos direitos reservados.

Símbolos e Convenções

Neste documento a seguinte notação é considerada:

Comandos ou códigos: comandos, nomes de arquivos ou códigos inseridos no texto são enfatizados como `comando`, `arquivo` e `códigos`.



Nota: uma nota, por exemplo: o VRTherm pode utilizar modelos diferentes para a fase líquida e vapor.



Atenção: uma mensagem de cuidado, por exemplo: o modelo `IdealGas` não pode ser utilizado para descrever uma fase líquida.



Dica: uma dica para o usuário, por exemplo: para misturas com gases dissolvidos utilize o modelo `AssymetricPR`.



Linux: uma nota específica para plataformas POSIX (Linux e Unix), por exemplo: o VRTherm está disponível para Linux e pode estar disponível para outras plataformas Unix se desejado.



Windows: uma nota específica para plataformas Win32 (Windows 95 e superiores, Windows NT 4 e superiores), por exemplo: o windows não diferencia letras maiúsculas de minúsculas nos nomes dos arquivos.



Em construção: notifica um assunto ainda em desenvolvimento.

Suporte, Contato e Atualizações

Para a obtenção de suporte entre em contato com a VRTech:

- Na internet www.vrtech.com.br
- Através de correio eletrônico suporte@vrtech.com.br

Histórico de atualizações do VRTherm:

- **30 julho 2009 - versão 1.0.0**
- **30 outubro 2009 - versão 1.0.2**
 - Melhorias no manual.
 - Correção de bugs de salvamento de propriedades dos equipamentos e correntes

1 Introdução

Neste capítulo o RecoVR e suas principais características são apresentadas. No final do capítulo podem ser encontradas as instruções para a instalação do RecoVR.

Sumário

1.1	Introdução ao RecoVR	2
1.2	Importância do Gerenciamento Adequado dos Recursos Hídricos Industriais	2
1.3	Tecnologia	3
1.4	Instalação	3
1.4.1	Controle de Uso	3
1.4.2	Instalando RecoVR no Windows	4
1.4.3	Resolução de Problemas de Instalação	4

1.1 Introdução ao RecoVR

Embora o setor industrial seja responsável pelo consumo de grandes quantidades de água e do descarte de efluentes poluídos, existem metodologias consolidadas para amenizar tais problemas. Uma das maneiras de se buscar a minimização do consumo de água e descarte de efluentes é a utilização de ferramentas de integração mássica de processos. Para tal, é necessário um grande conhecimento das necessidades hídricas do processo como um todo e, neste âmbito, o RecoVR oferece as ferramentas necessárias para tornar viável a aplicação de metodologias de reúso de águas industriais.

O software RecoVR é uma ferramenta computacional para gerenciamento de recursos hídricos (água e efluentes), disponibilizando diversas funcionalidades para representar, modelar, simular e detectar problemas em balanços hídricos. Além disso, é possível realizar acompanhamento histórico de dados do circuito de uso de água e realizar o projeto de redes de reúso.

1.2 Importância do Gerenciamento Adequado dos Recursos Hídricos Industriais

Gerenciar adequadamente o balanço hídrico de indústrias é de suma importância para evitar desperdícios, reduzir custos e preservar o meio ambiente. Com o gerenciamento adequado dos mesmos, podemos obter diversas vantagens, entre elas:

- Otimizar o balanço hídrico.
- Obter vantagens com publicidade e marketing ambiental.
- Entre outros.

RecoVR fornece ferramentas para visualizar e gerenciar de forma simplificada as informações relativas ao balanço hídrico. Com tais ferramentas, é possível:

- Detecção de vazamentos.
- Detecção de gargalos nos processos.
- Detecção de equipamentos com maiores custos operacionais.
- Escolher a melhor forma de desativar equipamentos para manutenção.

- Fechar balanços de massa.
- Estimar vazões e composições de balanços com e sem reciclo.
- Determinar o melhor ponto de alocação de instrumentos de medição de vazão e composição.
- Projetar redes de reúso de água com considerações econômicas e operacionais.

1.3 Tecnologia

O RecoVR utiliza as mais modernas e eficientes tecnologias, tanto em visualização de dados, quanto em motores de cálculo. Entre elas, podemos citar:

- Completamente desenvolvido em linguagem Java, uma das mais modernas linguagens de programação.
- Modernas bibliotecas de visualização para a montagem do fluxograma de processo.
- Motores de cálculo que usam a tecnologia voltada à equações, ao contrario da antiga sequencial-modular usada pela maioria dos simuladores comerciais.
- Motores de cálculo que usam álgebra esparsa, que reduz o tempo computacional e o consumo de memória dos cálculos.
- Indicação visual do status do diagrama, permitindo identificar problemas de consistência de equações logo ao se construir o diagrama.
- Projeto de redes de reúso automatizado.

1.4 Instalação

RecoVR está disponível para a plataforma Win32. Consulte a VRTech para versões em outras plataformas.

1.4.1 Controle de Uso

USB é a sigla para Universal Serial Bus.

Os produtos da VRTech são distribuídos com um sistema de controle de uso via chave eletrônica USB. Para o uso em rede é necessária apenas uma chave conectada a um computador da rede. Esta máquina será o **servidor** de licenças.



Atenção: Antes de desconectar a chave eletrônica da máquina servidor de licenças o serviço deve ser parado. Caso contrário os dados gravados na chave eletrônica podem ser corrompidos, inutilizando a chave.

O servidor permitirá o uso concorrente do software, através da rede, para outras máquinas - os **clientes**. O número de clientes que podem utilizar simultaneamente o software, depende do número de licenças adquiridas.

1.4.2 Instalando RecoVR no Windows

O RecoVR é compatível com Windows 95, 98, Me e XP, além de NT 4, 2000, 2003 e Vista. Para instalar o RecoVR no Windows basta executar o programa de instalação

```
recovr-win32-<VERSAO>.exe
```

e seguir os passos na tela.



Atenção: Na máquina onde será conectada a chave eletrônica selecione a opção **Instalação para Servidor de Licenças**, para as demais máquinas da rede selecione a opção padrão. Outra opção é, na máquina servidor de licenças, instalar o software em um diretório comum à rede o qual poderá ser acessado diretamente por todas as outras máquinas sem a necessidade da instalação clientes.

1.4.3 Resolução de Problemas de Instalação

Nesta seção serão apresentados algumas dicas para solucionar possíveis problemas de instalação do RecoVR relativos à chave de controle em ambientes de rede. Se alguns cuidados forem tomados estes problemas podem ser evitados ou até mesmo resolvidos. Caso algum problema persista entre em contato com a VRTech pelo mail suporte@vrtech.com.br.

Siga as seguintes instruções na ordem que são apresentadas:

- Assegure-se que de a rede onde o RecoVR será instalado está acessível e funcional.
- Verifique se o programa NrSrv está rodando na máquina servidor. O seguinte ícone deve existir na barra de tarefas.



Figura 1.1: Ícone NrSrv.

- Contacte co administrador da rede e verifique que as máquinas clientes e servidor encontram-se na mesma máscara de rede.
- Verifique se a chave de controle pode ser acessada da própria máquina servidor. Isto pode ser feito rodando o programa RecoVR localmente.
- Certifique-se de que o servidor de licenças pode ser visto pelas máquinas clientes rodando o comando *ping*. Para maiores dúvidas consulte seu gerente de rede.
- Tente rodar o programa NrMon (que acompanha o RecoVR) a partir da máquina cliente e veja se o servidor aparece conforme a figura abaixo:

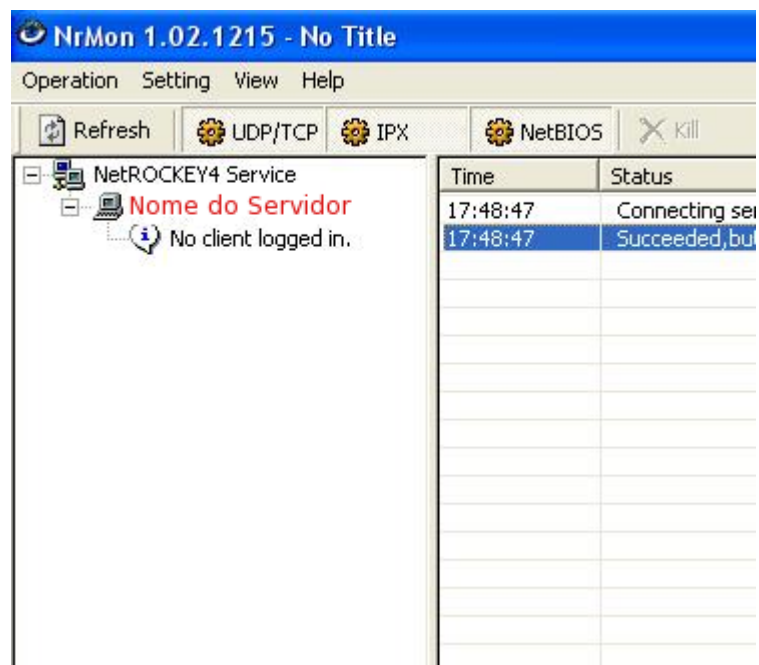


Figura 1.2: Programa NrMon.

- Verifique se há algum firewall habilitado. Certifique-se de que a porta 3152 está liberada.

2 Visão Geral

Neste capítulo iremos apresentar uma visão geral da interface gráfica com o usuário do RecoVR e suas principais características.

2.1 Abrindo o RecoVR

Ao abrir o software RecoVR a seguinte janela será apresentada, perguntando ao usuário qual ação que deseja tomar: Abrir um arquivo ou criar um novo diagrama.



Atenção: As figuras aqui apresentadas podem ter diferenças em relação às telas e janelas encontradas pelo usuário, devido às configurações do sistema operacional e também às constantes atualizações do aplicativo.

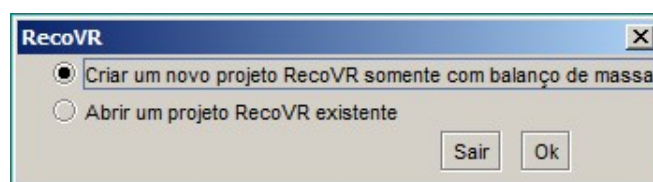


Figura 2.1: Diálogo Inicial.

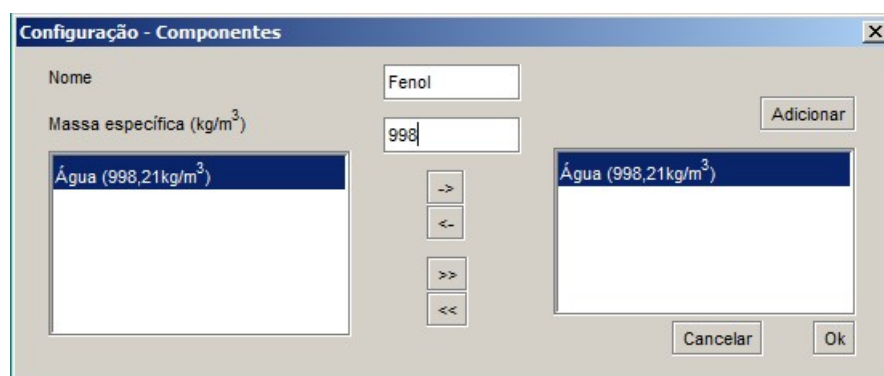


Figura 2.2: Configurações dos componentes usados no balanço de massa do diagrama.

Caso o usuário opte por abrir um arquivo existente, o diálogo de seleção de arquivo será apresentado, caso contrário, o diálogo de configuração de componentes será aberto, conforme [Figura 2.2](#).

O diálogo de configuração de componentes tem como objetivo adicionar os componentes que serão considerados no diagrama de processos, através de balanços de massa global e por componente. Após preenchido o nome e a massa específica do componente, clique em **Adicionar**. Após a adição de todos os componentes necessários, clique em **OK**. Em seguida o usuário terá acesso ao diagrama de processos vazio, ou previamente salvo, conforme [Figura 2.3](#).

Existem 4 regiões na interface gráfica. À esquerda fica a árvore de equipamentos, [Figura 2.4](#), onde são listados todos os equipamentos e correntes de processo que o usuário adiciona ao fluxograma.

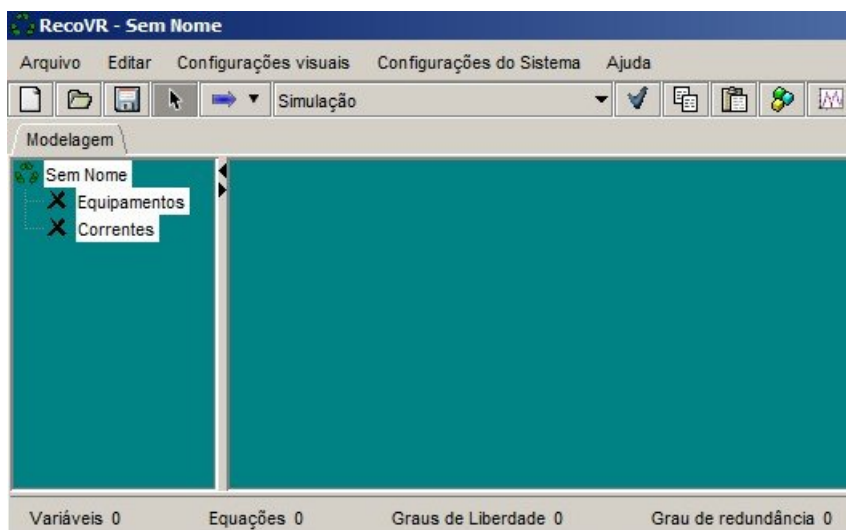


Figura 2.3: Diagrama de processo vazio.

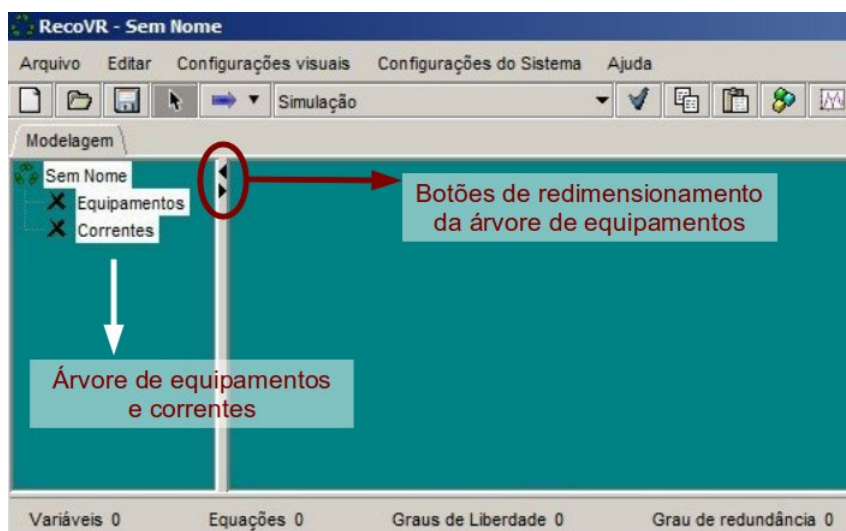


Figura 2.4: Árvore de equipamentos e correntes de um diagrama vazio.

Caso o usuário possua equipamentos no diagrama de processos, a árvore terá a aparência conforme apresentado na [Figura 2.5](#).

Na parte superior da interface, fica a barra de menus e logo abaixo da mesma, os botões de ações; na parte inferior, ou rodapé do programa fica a barra de status, todos apresentados na [Figura 2.6](#).

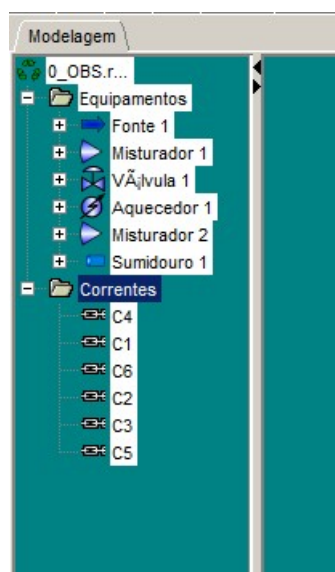


Figura 2.5: Árvore de equipamentos e correntes de um diagrama não vazio.

Na barra de menus ficam localizadas ações padrões presentes na maioria dos aplicativos, como abrir, salvar, salvar como, novo arquivo, copiar, colar, etc. Também estão presentes na barra de menus, ítems de configurações visuais e de motores de cálculos, sendo estas apresentadas com mais detalhes no [Capítulo 7](#).

Nos botões de ações também estão presentes algumas ações padrão, como abrir, salvar, salvar como, novo arquivo, copiar, colar. Nesta área o usuário pode selecionar a ação de cálculo a ser executada no diagrama através da lista dos botões de ações. Estão presente, ainda, os botões de adicionar novos componentes e de adição de novas unidades de medição.

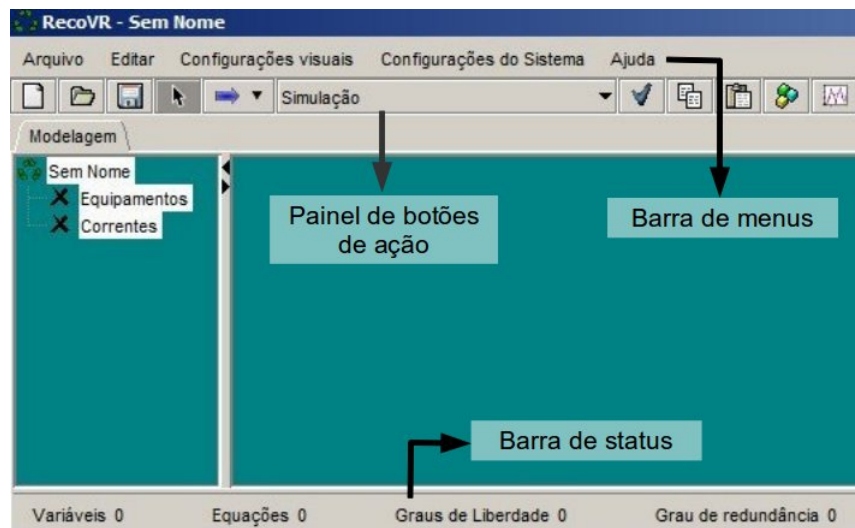


Figura 2.6: Barra de menus, status e botões de ação.

Na parte central da interface é onde o diagrama de processos, com seus equipamentos e conexões será construído, conforme apresentado na [Figura 2.7](#).

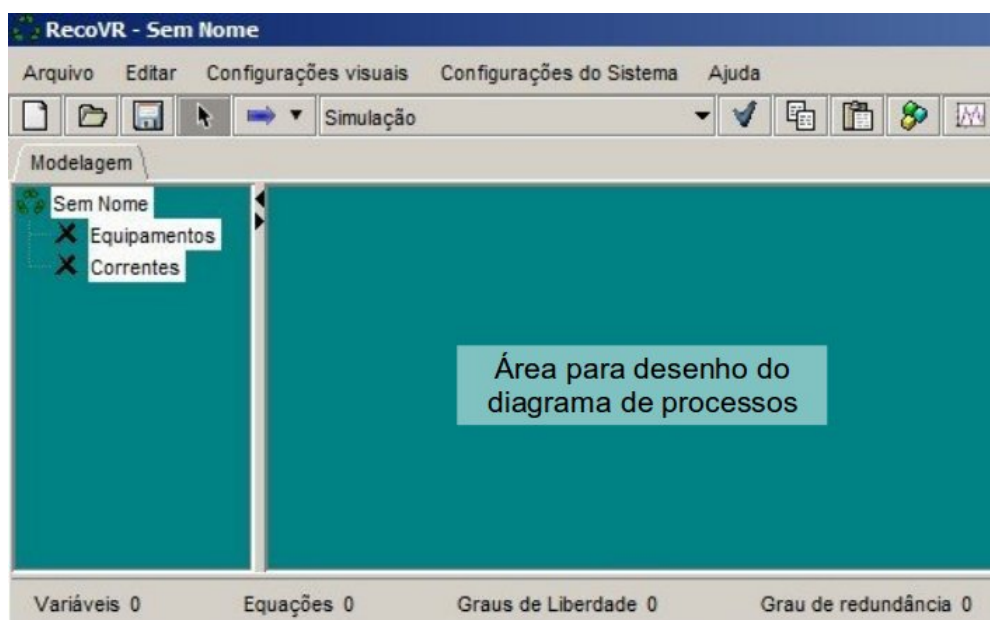


Figura 2.7: Área para desenho do diagrama de processos.

3 Equipamentos e Correntes

Neste capítulo iremos apresentar os equipamentos de processos disponíveis para a construção dos diagramas de processos e a maneira como se dá a conexão entre eles.

Sumário

3.1	Detalhes dos equipamentos	14
3.2	Propriedades dos equipamentos	15
3.3	Conectando equipamentos	20
3.4	Modelando equipamentos	22
3.5	Modelos matemáticos internos	25

O RecoVR possui uma biblioteca de equipamentos com as unidades mais usadas em balanços hídricos de indústrias de processos. Cada equipamento possui uma representação gráfica e pode ser conectado para representar o balanço hídrico da indústria. Além de representar graficamente o balanço, cada equipamento possui um modelo matemático para calcular as vazões e composições de saída do mesmo. Esses modelos possuem parâmetros que podem ser ajustados pelo usuário. Os equipamentos presentes na biblioteca de modelos são apresentados na [Seção 3.4](#).

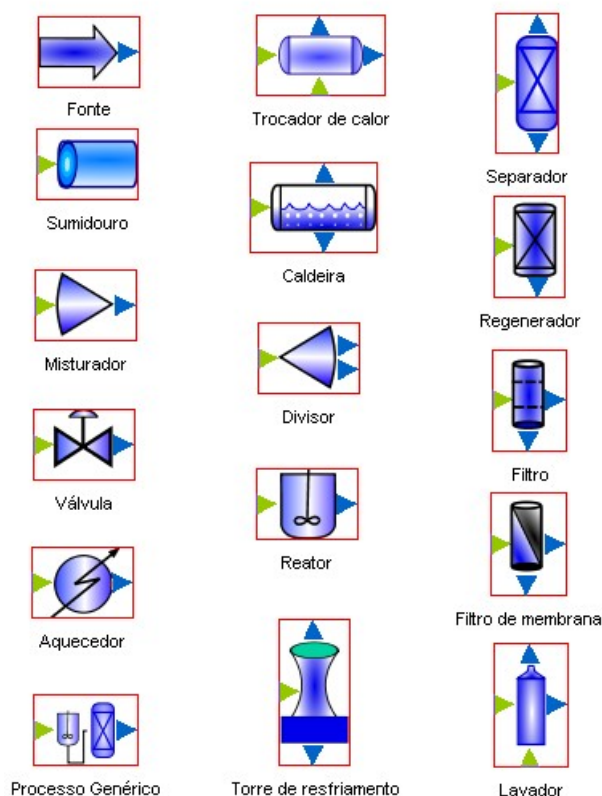


Figura 3.1: Biblioteca de equipamentos.

A biblioteca de equipamentos pode ser acessada através do botão de ação na biblioteca de equipamentos, conforme [Figura 3.2](#).

Para adicionar o equipamento ao diagrama, basta selecioná-lo e clicar na posição desejada do diagrama.



Atenção: Alguns equipamentos, como o Reator, só permitem ser adicionados no diagrama se houverem mais de um componente no sistema. Caso contrário, uma mensagem de erro será apresentada.

O nome do equipamento será dado automaticamente em uma ordem sequencial, sendo possível alterá-lo clicando 2 vezes no

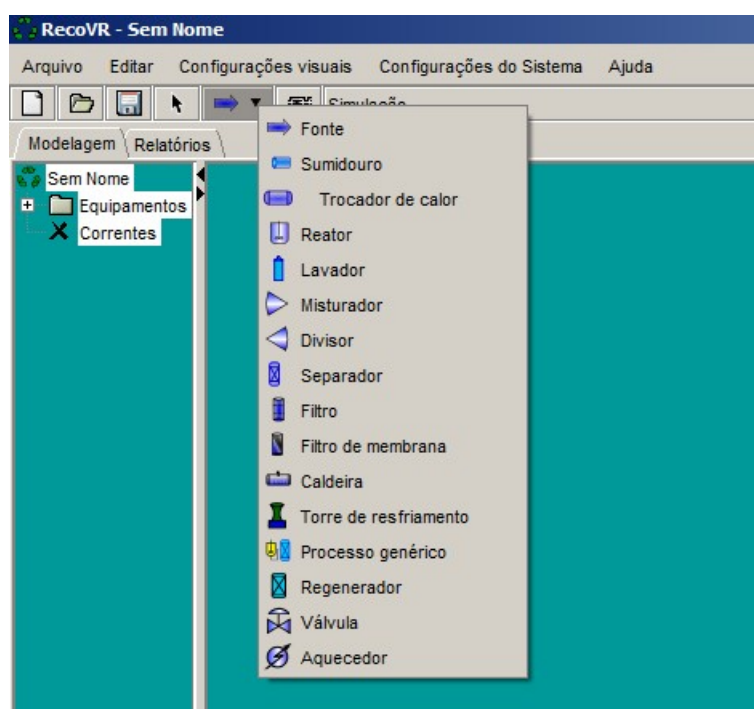


Figura 3.2: Acessando a biblioteca de equipamentos.

mesmo. Também é possível arrastar o nome do equipamento, clicando em cima do nome com o botão esquerdo e arrastando-o. Os equipamentos possuem ainda um *tool-tip* ou dica, apresentando o seu estado e, se este já tiver sido calculado, os valores de vazões e composições de suas portas, conforme [Figura 3.3](#).



Figura 3.3: Tool-tip dos equipamentos.

3.1 Detalhes dos equipamentos

Cada equipamento é composto por elementos denominados portas, que significam de onde chegam ou partem conexões ou correntes. As portas são representadas por triângulos localizados à esquerda, direita, acima ou abaixo. Existem dois tipos de portas, as de entrada, de cor verde, e saída, de cor azul, sendo que somente será possível conectar uma porta de saída à uma porta

de entrada. Não existe limite para o número de conexões, sendo possível inclusive conectar a porta de saída de um equipamento nele mesmo (para o caso de representação de um reciclo, por exemplo).

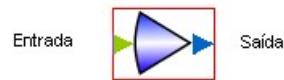


Figura 3.4: Porta de entrada e saída de um equipamento.

Os equipamentos específicos podem ter quantas portas de entrada ou saída forem necessárias para sua caracterização. No caso do equipamento genérico, o usuário pode personalizar o número das suas portas de entrada e saída, assim que o mesmo é adicionado no diagrama, conforme [Figura 3.5](#).

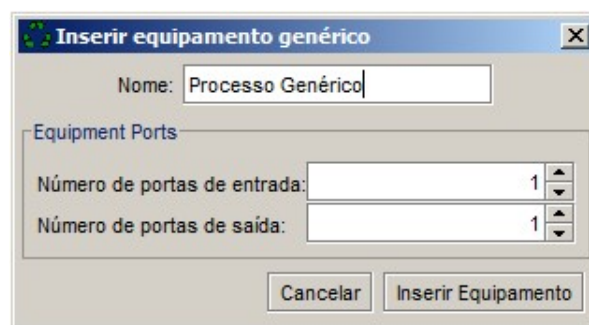


Figura 3.5: Configuração do número de portas de entrada e saída de um equipamento genérico.

Cada equipamento possui um estado visual para representar a necessidade de configuração do mesmo. Equipamentos com bordas vermelhas, representam blocos com conexões pendentes, salientando a necessidade da conexão de todas as suas portas. Equipamentos com bordas amarelas indicam blocos conectados porém ainda não configurados, ou seja, seus atributos ainda não foram especificados. Equipamentos com bordas verdes, representam equipamentos completamente configurados e pronto para serem simulados.



Dica: Equipamentos pode ser copiados e colados no diagrama.

3.2 Propriedades dos equipamentos

Ao clicar com o botão direito do mouse sobre um equipamento, um menu surgirá com algumas ações possíveis, entre elas a possibilidade de configurar suas propriedades, conforme [Figura 3.6](#).



Figura 3.6: Menu do equipamento.

Ao clicar em propriedades, um diálogo semelhante à [Figura 3.7](#) será apresentado.

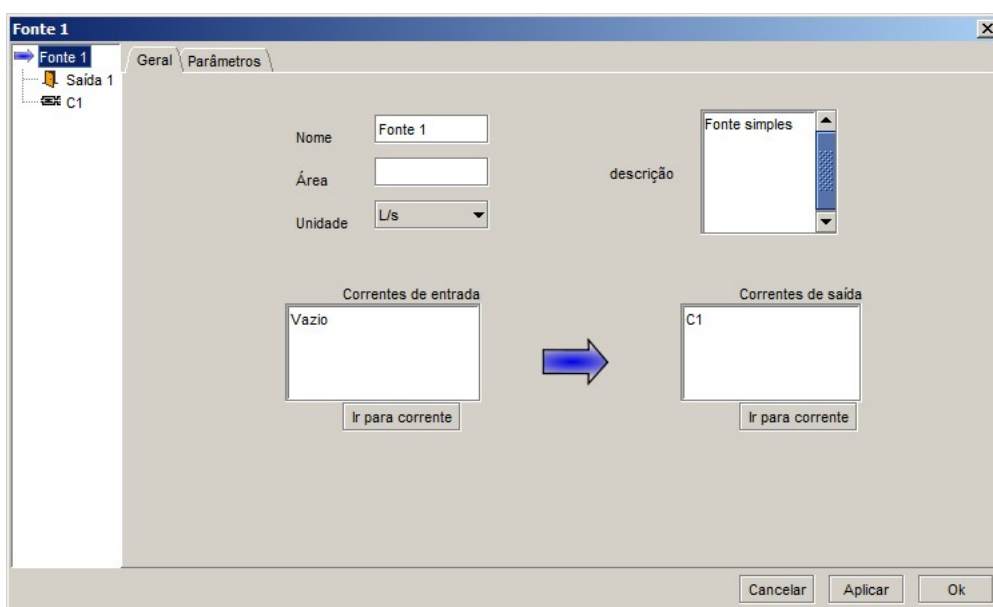


Figura 3.7: Diálogo principal da janela de configuração do equipamento.

Na aba *Geral* do diálogo, as principais informações dos equipamentos são apresentadas, sendo algumas delas vazias para edição e salvamento, como, por exemplo, a área industrial onde o mesmo se encontra. Caso existam conexões com outros equipamentos, as mesmas serão listadas nesta guia/aba. Também é possível trocar o sistema de unidades de medida que será usado nas medições do equipamento através da caixa de listagem conforme [Figura 3.8](#).

Na guia/aba de parâmetros, os parâmetros dos modelos matemáticos dos equipamentos são configurados, conforme [Figura 3.9](#). Os modelos e parâmetros serão melhor detalhados na [Seção 3.5](#).

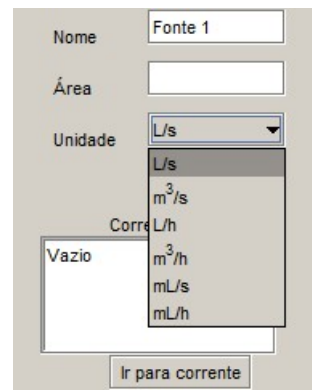


Figura 3.8: Mudando unidade de medição do equipamento.

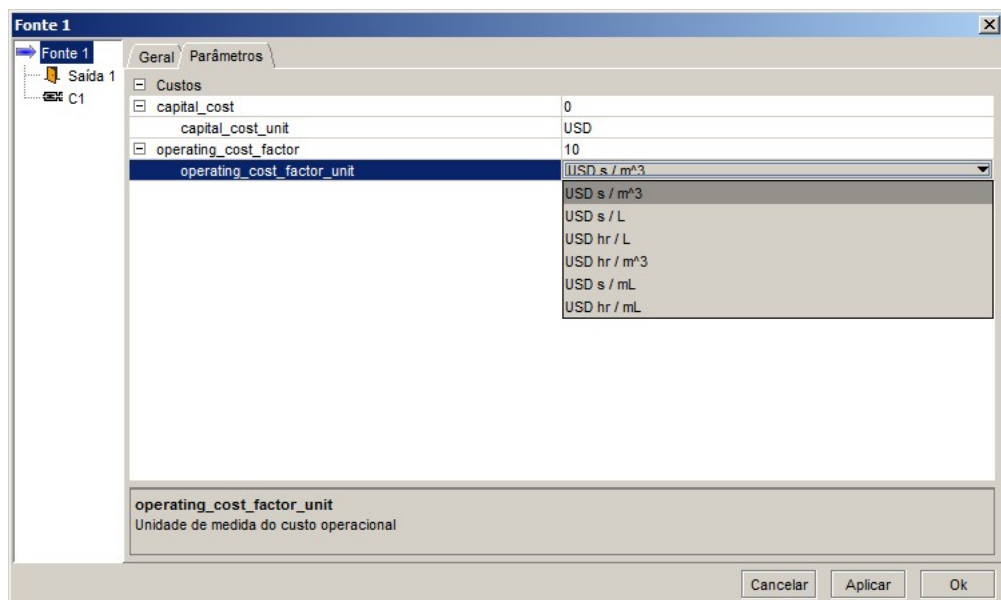


Figura 3.9: Configurando o parâmetro de custo variável no modelo de Fonte.

Cada parâmetro do equipamento pode ou não possuir unidade de medida que pode escolhida na caixa de listagem conforme [Figura 3.9](#). A descrição detalhada do parâmetro selecionado é apresentada no painel inferior desta aba.



Dica: É possível cadastrar unidades personalizadas através do último botão à direita da barra de botões de ação, tal diálogo é apresentado na [Figura 3.10](#).

Tão importante quanto a configuração dos equipamentos é a configuração das portas de entrada e saída dos mesmos. Nas portas ficam armazenadas informações de medições de vazão composição, suas precisões e seus limites operacionais. Configurar uma

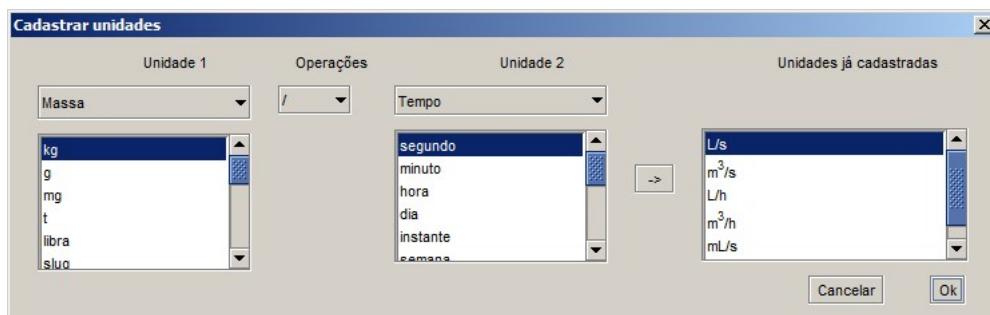


Figura 3.10: Cadastrando unidades de medida.

medida em uma porta de entrada ou saída significa dizer que este é um dado disponível do processo, seja por especificação ou pela existência de um medidor de vazão ou composição associado a esta porta. A tela de configuração das portas de cada equipamento é apresentada na [Figura 3.11](#).

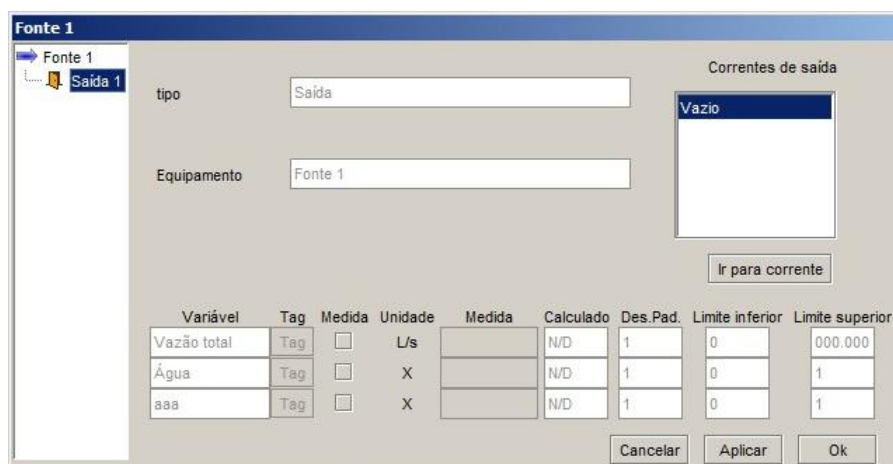


Figura 3.11: Configurando as portas dos equipamentos.

Desta forma, por exemplo, para configurar uma medida da vazão de saída de um equipamento, o usuário deve abrir a janela de propriedades do equipamento, selecionar a respectiva porta e então marcar a variável *Vazão Total* como medida, no *checkbox*. A partir disto, estarão presentes os seguintes campos de configuração da medida:

Tabela 3.1: Configuração de medições nas portas

Nome	Descrição
Unidade	Unidade de medição, conforme configurado na aba <i>Geral</i> .
Medida	Medida de vazão ou composição
Calculado	Caso o diagrama tenha sido calculado por uma simulação ou reconciliação de dados, os resultados serão apresentados nesta caixa.
Des. Pad.	Desvio padrão do instrumento de medição associado à precisão do instrumento. Pode ser um valor absoluto ou relativo.
Limite Inferior	Vazão mínima em que o equipamento opera. É importante para melhorar a precisão nos motores de cálculo.
Limite Superior	Vazão máxima em que o equipamento opera. É importante para melhorar a precisão nos motores de cálculo.

Um mesmo dado de medição de vazão total pode também ser incorporado em medições de composições, porém, neste caso, a unidade de medição é fixa e dada em fração mássica do componente.



Atenção: Lembre que no caso de medições em composições é necessário fornecer somente $(N - 1)$ composições.



Dica: Dependendo da versão do RecoVR, a inserção de medidas pode ser adquiridas do banco de dados historiador do usuário, ao invés de digitados manualmente. Para maiores informações consulte o suporte (suporte@vrtech.com.br) da VRTech para saber como integrar o RecoVR com o sistema historiador de sua empresa.

Caso exista alguma corrente conectada ao equipamento, ela também será listada na árvore, e será apresentado um diálogo de configuração da mesma, similar ao diálogo de configuração das portas. A diferença na configuração entre uma porta e corrente, é que na última é apenas possível configurar a vazão total. As medições de composições das correntes são consideradas as mesmas das portas de origem dela, ou seja, da porta de saída do equipamento ao qual a corrente está conectada. O diálogo de configuração das correntes é apresentado na [Figura 3.12](#).

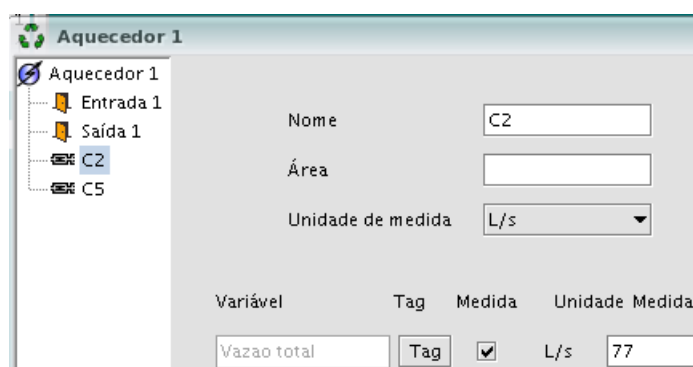


Figura 3.12: Configurando correntes dos equipamentos.

Após configurar os dados do equipamento, os parâmetros e as medições, o mesmo ficará com suas bordas da cor verde, indicando que este está propriamente configurado e pronto para ser calculado.

3.3 Conectando equipamentos

Para realizar a conexão dos equipamentos, basta clicar em uma porta de saída com o botão do meio do mouse e arrastar até uma porta de entrada de outro equipamento ou do próprio.



Dica: Vocês sabia que a rodinha do seu mouse também funciona como botão, clique nela e confira!



Atenção: Em computadores onde não exista mouse com botão do meio, como em laptops por exemplo, o mesmo efeito pode ser dado pressionando a tecla **Alt** e usando o botão esquerdo do mouse.

A sequência de conexão é apresentada na [Figura 3.13](#), [Figura 3.14](#) e [Figura 3.16](#).



Atenção: A ordem de conexão é sempre de uma porta de **SAÍDA** para uma porta de **ENTRADA**.



Figura 3.13: Conectando portas de equipamentos.

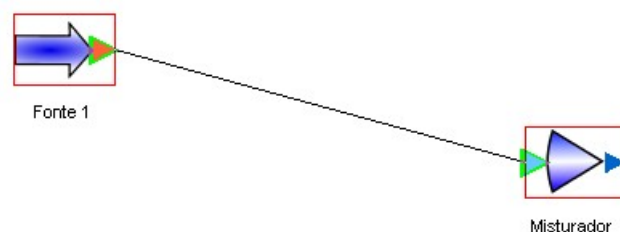


Figura 3.14: Conectando portas de equipamentos.

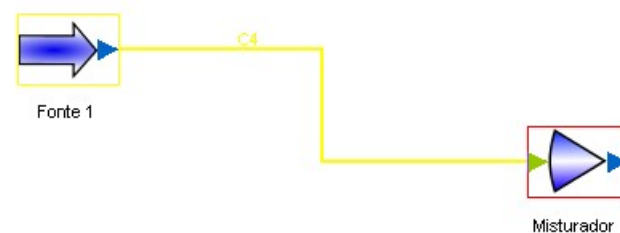


Figura 3.15: Conectando portas de equipamentos.

Observações:

- O nome da corrente (e dos equipamentos) é arbitrado automaticamente, sendo que o mesmo pode ser mudado através de um clique duplo sobre a corrente (ou o equipamento).
- A rota da linha da conexão/corrente é calculada automaticamente, visando o desvio dos equipamentos de origem e destino.
- É possível mover as quebras de linha clicando sobre as mesmas e arrastando-as.

Note que a conexão na [Figura 3.15](#) ficou da cor amarela, indicando que ela não pode ser calculada pois não foram configuradas as medições em suas portas de origem, destino ou na própria corrente. Uma explicação mais detalhada sobre o sistema de cores das correntes é apresentada na [Seção 4.1](#).

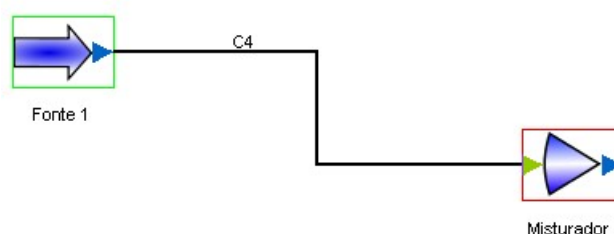


Figura 3.16: Correntes com medições de vazões e composições previamente configuradas.



Em construção: Ainda não está disponível a opção de arrastar e mover o nome das correntes.

3.4 Modelando equipamentos

Conforme mencionado anteriormente, os equipamentos da biblioteca do RecoVR possuem modelos matemáticos para a realização de cálculos diversos. A medida que cada equipamento é adicionado ao diagrama de processos, um sistema de equações começa a ser montado. Com a configuração apropriada dos parâmetros dos modelos e de suas medidas (de vazões e/ou composições) é possível realizar diversos cálculos e extrair informações importantes sobre o balanço hídrico. Entre os diversos cálculos disponíveis, se encontram:

- Observabilidade do diagrama.
- Redundância de medições.
- Simulação estacionária.
- Reconciliação de dados.

- Detecção de erros de medição.
- Projeto de redes de reúso de água.

Cabe ressaltar que os modelos utilizados para todos os cálculos citados acima são os mesmos, diferenciando somente os motores de cálculo para cada tarefa.



Dica: Vocês sabia que o RecoVR utiliza a tecnologia de simulação voltada à equações? Esta é mais moderna em relação à antiga tecnologia de simulação sequencial-modular, existente na maioria dos simuladores comerciais.

Os equipamentos da biblioteca de modelos do RecoVR são abstraídos da seguinte forma:

- Uma porta de entrada com balanço de massa total e balanço por componente.
- Uma porta de saída com balanço de massa total.
- Balanço por componente entre o que sai da porta de entrada e entra na porta de saída.

Tal abstração pode ser melhor visualizada na [Figura 3.17](#).

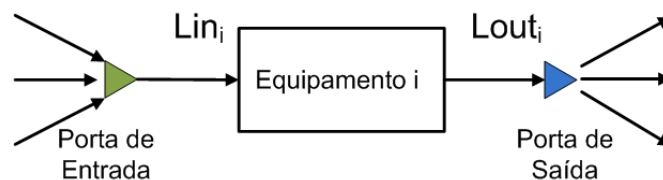


Figura 3.17: Modelo de balanço de massa nas portas e no equipamento.

Nas portas de entrada e saída, é adicionada uma equação da soma das frações mássicas, ou seja:

$$\sum_{i=1}^n X_i = 1 \quad (3.1)$$

Onde X_i é a fração mássica do componente i .

Conseqüentemente, é necessário configurar como medida **SO-MENTE** a fração mássica de $(N - 1)$ componentes.

Especificamente para a(s) porta(s) de entrada, a equação de balanço segue a seguinte forma, sendo o balanço apresentado esquematicamente através da [Figura 3.18](#). Para um mesmo equi-

pamento i , temos:

$$\sum_{k=1}^n L_{i,k} = Lin_i \quad (3.2)$$

Onde:

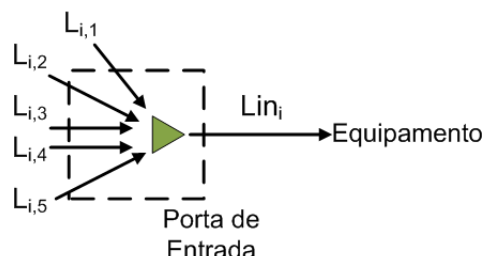


Figura 3.18: Modelo de balanço de massa na porta de entrada.

$L_{i,k}$: Vazão total de líquido que sai da porta do processo k e entra na porta do processo i .

Lin_i : Vazão total de líquido que sai da porta de entrada do próprio processo e alimenta o mesmo.

Ainda para a porta de entrada existe o balanço por componente, apresentado na [Figura 3.19](#). Para um mesmo componente j , e um mesmo equipamento k , temos:

$$\sum_{i=1}^n X_{out_{i,j}} \cdot L_{i,k} = X_{in_{i,j}} \cdot Lin_i \quad (3.3)$$

Onde:

$L_{i,k}$: Vazão total de líquido que sai da porta do processo k e entra na porta do processo i .

Lin_i : Vazão total de líquido que sai da porta de entrada e alimenta o processo.

$X_{out_{k,j}}$: Fração mássica do componente j que sai do equipamento k .

$X_{in_{i,j}}$: Fração mássica do componente j que sai da porta de entrada do próprio processo e alimenta o mesmo.

Entre a porta de entrada e a porta de saída, existe o modelo matemático do respectivo equipamento. Para cada equipamento, o modelo é diferente. Os equipamentos e os respectivos modelos internos estão detalhados na [Seção 3.5](#).

Existe ainda, o balanço de massa total na porta de saída, sendo o mesmo representado esquematicamente pela [Figura 3.20](#). Para um mesmo processo i , temos que:

$$L_{out_i} = \sum_{k=1}^n L_{k,i} \quad (3.4)$$

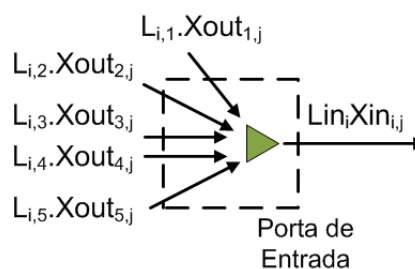


Figura 3.19: Modelo de balanço por componente na porta de entrada.

Onde:

$L_{k,i}$: Vazão total de líquido que sai da porta do processo i e entra na porta do processo k .

$Lout_i$: Vazão total de líquido que sai do equipamento i e alimenta a porta de saída.

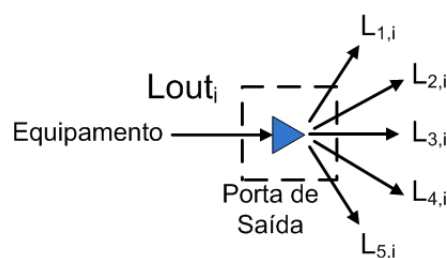


Figura 3.20: Modelo de balanço de massa na porta de saída.

3.5 Modelos matemáticos internos

Todos os equipamentos possuem um modelo matemático que permite o cálculo das vazões e composições de saída, baseado no fluxo de massa que entra no mesmo. Tais modelos são apresentados a seguir, sendo que a relação dos equipamentos e seus modelos é apresentado na [Tabela 3.2](#).

Processos Genéricos

O Processo Genérico e o Regenerador, ao contrário dos demais equipamentos que possuem modelos matemáticos fixos, possuem modelos que podem ser adicionados e removidos pelo usuário. Tal opção pode ser acessada na aba Seleção de Modelos (ou Model Selection), conforme apresentado na [Figura 3.21](#).



Atenção: Cabe ressaltar, que além do modelo de custo, somente mais um modelo de balanço de massa pode ser adicionado. Caso

Tabela 3.2: Equipamentos e seus respectivos modelos internos

Equipamento	Modelo
Fonte	Custos
Sumidouro	Custos
Trocador de Calor	Custos, Balanço de massa entre pares de portas
Misturador	Custos, Balanço de massa para todos componentes
Lavador	Custos, Transferência de massa
Divisor	Custos, Balanço de massa de divisão para todos componentes
Separador	Custos, Balanço de massa por componente individual
Filtro	Custos, Balanço de massa por componente individual
Filtro de membrana	Custos, Balanço de massa por componente individual
Caldeira	Custos, Balanço de massa por componente individual
Torre de resfriamento	Custos, Transferência de massa
Processo genérico	Custos, escolhido pelo usuário
Regenerador	Custos, escolhido pelo usuário
Válvula	Custos, Balanço de massa para todos componentes
Aquecedor	Custos, Balanço de massa para todos componentes

Geral \ Parâmetros \ Model Selection \	
In use	Model
<input checked="" type="checkbox"/>	Custos Fixos e Operacionais
<input type="checkbox"/>	Balanço de massa padrão
<input type="checkbox"/>	Balanço de massa com adição de um componente específico.
<input type="checkbox"/>	Balanço de massa com divisão de componentes entre as portas de entrada e saída
<input type="checkbox"/>	Balanço de Massa com divisão entre portas de saída.
<input type="checkbox"/>	Transfere uma quantidade de um componente para outra corrente.
<input type="checkbox"/>	Balanço de massa entre pares de portas de entrada e saída.
<input type="checkbox"/>	Balanço de massa com modelo de conversão/reação

Figura 3.21: Seleção de modelos do *Processo Genérico* e *Regenerador*.

o usuário tente adicionar mais de um balanço de massa, será apresentada uma mensagem de erro.

Custos

O Modelo de custo está presente em todos os equipamentos, ele é usado para calcular o custo operacional do equipamento, baseado na vazão mássica total na entrada do mesmo. Caso o equipamento não possua porta de entrada, como no caso da *Fonte*, o custo é calculado a partir da vazão total de saída.

$$C_{Op} [USD] = V_{tot_{out}} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \cdot CF \left[\frac{USD}{\frac{Vol}{tempo}} \right] \quad (3.5)$$

Onde:

C_{Op} : Custo Operacional Total.

$V_{tot_{out}}$: Vazão Total de Saída ou Entrada do Eqp.

CF : Fator de custo.

Balanço de massa para todos componentes

$$V_{inletPort_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{outletPort_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \quad (3.6)$$

Onde:

$V_{inletPort_i}$: Vazão de entrada do componente i .

$V_{outletPort_i}$: Vazão de saída do componente. i .

Balanço de massa entre pares de portas para todos componentes

$$V_{inletPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{outletPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \quad (3.7)$$

$$V_{inletPort2_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{outletPort2_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \quad (3.8)$$

Onde:

$V_{inletPort1_i}$: Vazão de entrada do comp. i na porta 1.

$V_{outletPort1_i}$: Vazão de saída do comp. i na porta 1.

$V_{inletPort2_i}$: Vazão de entrada do comp. i na porta 2.

$V_{outletPort2_i}$: Vazão de saída do comp. i na porta 2.

Obs.: Não há mistura ou transferência de massa.

Balço de massa de divisão para todos componentes

$$Ef \cdot V_{outPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] + (1 - Ef) \cdot V_{outPort2_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{inPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \quad (3.9)$$

Onde:

$V_{outPort1_i}$: Vazão de saída do comp. i da porta 1.

$V_{outPort2_i}$: Vazão de saída comp. i da porta 2.

Ef : Fator de divisão entre a $V_{outPort1_i}$ e $V_{outPort2_i}$.

$V_{inPort1_i}$: Vazão de entrada comp. i da porta 1.

Balço de massa por componente (eficiências individuais)

$$Ef_i \cdot V_{outPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] + (1 - Ef_i) \cdot V_{outPort2_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{inPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \quad (3.10)$$

Onde:

$V_{outPort1_i}$: Vazão de saída comp. i da porta 1.

$V_{outPort2_i}$: Vazão de saída comp. i da porta 2.

Ef_i : Fator de divisão entre a $V_{outPort1_i}$ e $V_{outPort2_i}$ para o componente i .

$V_{inPort1_i}$: Vazão de entrada comp. i da porta 1.

Taxa de reação mássica

Para o componente chave:

$$V_{outPort1_{chave}} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{inPort1_{chave}} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \cdot (1 - Xa) \quad (3.11)$$

Para os demais componentes:

$$V_{outPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{inPort1_{chave}} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \cdot (\theta_i - stoic_i \cdot Xa) \quad (3.12)$$

Onde:

$V_{outPort1_i}$: Vazão de saída do comp. i da porta 1.

$V_{inPort1_i}$: Vazão de entrada do comp. i da porta 1.

Xa : Conversão

θ_i : Razão entre a vazão de entrada do comp. i e a vazão de entrada do comp. chave.

$stoic_i$: Coeficiente estequimétrico do comp. i .

Transferência de massa por componente

$$V_{outPort2_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = V_{inPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] + Ef_i \cdot V_{inPort2_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \quad (3.13)$$

$$V_{outPort1_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] = (1 - Ef_i) \cdot V_{inPort2_i} \left[\frac{Vol}{tempo} \right] \quad (3.14)$$

Onde:

$V_{outPort1_i}$: Vazão de saída do comp. i da porta 1.

$V_{outPort2_i}$: Vazão de saída do comp. i da porta 2.

$V_{inPort1_i}$: Vazão de entrada do comp. i da porta 1.

$V_{inPort2_i}$: Vazão de entrada do comp. i da porta 2.

Ef_i : Fator de transferência entre a $V_{inPort1_i}$ e $V_{outPort2_i}$ para o comp. i .

4 Simulação e Observabilidade de Diagramas

Neste capítulo, serão apresentadas as funcionalidades de simulação e detecção de observabilidade do diagrama de processos.

Sumário

4.1 Observabilidade de Correntes de Processo	31
4.1.1 Exemplo de determinação de observabilidade	31
4.2 Simulação	36
4.2.1 Introdução	36
4.2.2 Conceitos Importantes	37
4.2.3 Executando a simulação	40

4.1 Observabilidade de Correntes de Processo

Muitas vezes não temos presentes no diagrama de processos medições para todas as correntes. Porém, mesmo sem algumas medições, é possível determinar vazões, por uma propriedade do balanço de massa. Ainda que não seja possível determinar todas as vazões do processo, pode ser possível obter pelo menos as de algumas seções do fluxograma de processos com o RecoVR.

A detecção de observabilidade do diagrama de processos permite determinar quais correntes não medidas podem ser observáveis devido ao balanço de massa. Tal funcionalidade ajuda a estimar as vazões não medidas e indica locais convenientes para a alocação de novos medidores na planta.

Uma corrente observável é uma corrente que, mesmo sem medições configuradas, tem sua vazão e composições determinadas através do balanço de massa.

A observabilidade do diagrama é determinada automaticamente através de um motor de cálculo do RecoVR. A cada vez que uma medida é inserida em uma porta ou corrente este cálculo é realizado. A propriedade de observabilidade das correntes é apresentada diretamente no diagrama de processos: correntes observáveis são apresentadas em preto, não observáveis em amarelo e redundantes também em preto. O conceito de correntes redundantes será apresentado com maior detalhes na [Seção 5.1](#).

4.1.1 Exemplo de determinação de observabilidade

Para fins de ilustração iremos apresentar um pequeno diagrama de processos. Embora bastante simples, o exemplo a seguir é bastante elucidativo, pois, permite o usuário acompanhar/validar os cálculos executados. Este exemplo trata-se de um *benchmark* de referência para determinação de observabilidade e redundância de diagramas de processo.

Suponha o diagrama apresentado na [Figura 4.1](#), já previamente conectado, composto por uma válvula com *by-pass*. Vamos recordar que para configurar um equipamento, é necessário clicar com o botão direito no mesmo e em seguida, clicar no ítem propriedades, conforme [Figura 4.2](#). A tela de configuração do equipamento será apresentada. Clicando na porta de entrada ou saída, é possível ter acesso à janela de configuração de medidas, conforme [Figura 4.3](#).

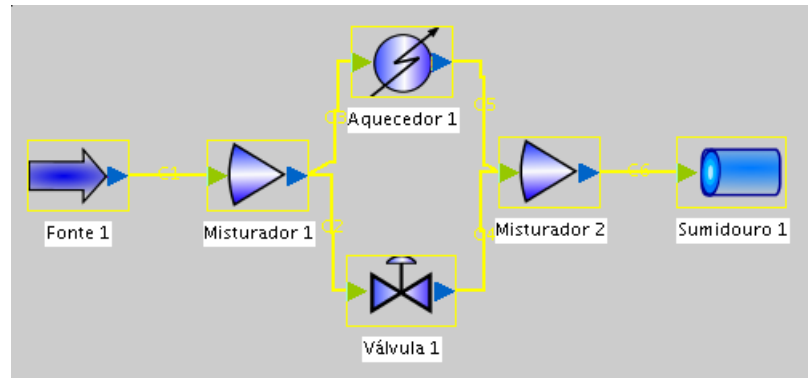


Figura 4.1: Diagrama exemplo, aquecedor com válvula de by-pass, somente com as conexões configuradas.



Figura 4.2: Menu de configuração do equipamento.

Fonte 1

Fonte 1

- Salda 1
- C1

tipo: Saída

Equipamento: Fonte 1

Correntes de saída: C1

Ir para corrente

Variável	Tag	Medida	Unidade	Medida	Calculado	Des.Pad.	Limite inferior	Limite superior
Vazão total	Tag	<input type="checkbox"/>	L/s		N/D	1	0	.000.000
Água	Tag	<input type="checkbox"/>	X		N/D	1	0	1

Cancelar Aplicar Ok

Figura 4.3: Janela de Configuração de medidas das portas.

Marcando o *check-box* da medida (quadrado cinza), é possível habilitar a inserção de uma medida de vazão ou composição, conforme **Figura 4.4**.

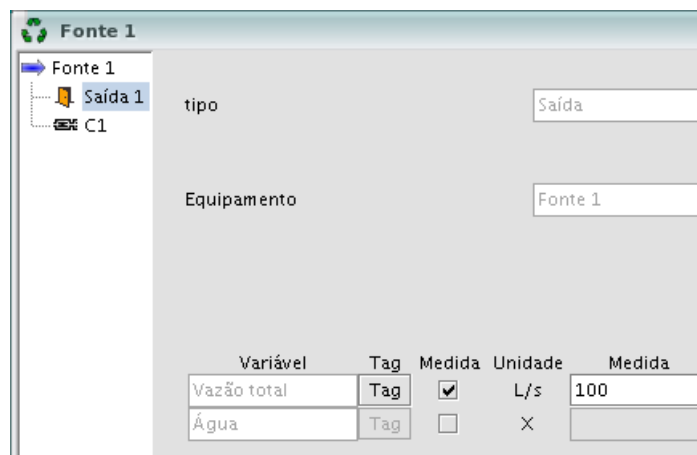


Figura 4.4: Janela de Configuração de medidas das portas.

Após isso, a medida pode ser considerada como configurada e, em seguida, clicando em OK, a janela será fechada e a corrente cuja variável medida foi configurada passará a ser apresentada na cor preta.

Embora não seja absolutamente necessário, é interessante também configurar a precisão, representada pelo desvio padrão (absoluto ou relativo) e os limites superiores e inferiores das medidas. Isto aumenta a velocidade e a robustez dos motores de cálculo.

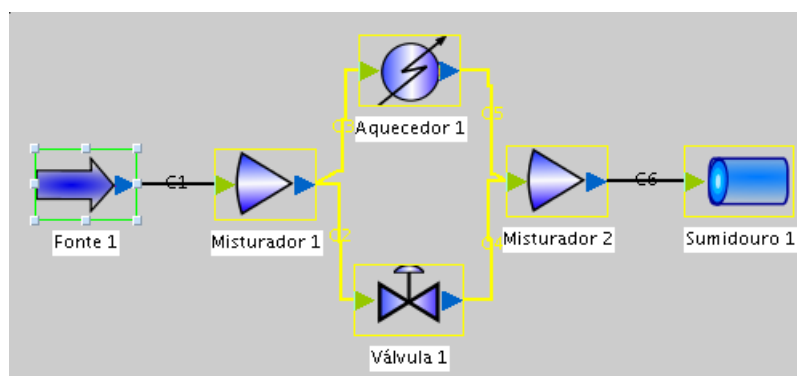


Figura 4.5: Diagrama com duas correntes observáveis.

Note que, após a configuração, a entrada do *Misturador 1* e a saída do *Misturador 2* apresentaram suas correntes na cor preta, indicando que as mesmas são observáveis — embora a medida tenha sido inserida apenas na porta de saída da *Fonte 1*. Tal resultado condiz com o sistema real, visto que o diagrama em questão não possui perdas. As entradas e saídas do *Aquecedor 1* e *Válvula 1*, permanecem em amarelo, pois suas medidas não podem ainda ser observadas, sendo necessário configurar pelo menos mais uma medição em uma dessas correntes para determinar as suas vazões.

Portanto, para deixar o diagrama completamente observável, é necessário adicionar mais uma medida nas portas de entrada ou saída do *Aquecedor 1* ou *Válvula 1*, ou mesmo nas correntes conectadas à estas portas. A adição de mais de uma medida caracterizará medidas redundantes (Seção 5.1).

Para adicionar uma medida em uma corrente, basta clicar com o botão direito sobre a mesma, acessando suas propriedades no menu que será exibido. Também é possível acessar a janela de medidas das correntes acessando as propriedades do equipamento o qual a corrente se conecta e navegando na árvore até a corrente em questão. A janela de configuração de medida da corrente é um pouco diferente da configuração da porta, não permitindo a adição de medição de composições, somente de vazões, como visto na Seção 3.2, Figura 3.12.

Após a configuração de uma medida, como por exemplo a corrente de entrada do *Aquecedor 1*, todas as correntes do diagrama passam a ter a cor preta, indicando que todas as correntes e portas são observáveis, conforme Figura 4.6.

Uma corrente só é considerada observável se a porta de origem da mesma tiver a vazão e composições medidas ou ambas observáveis.

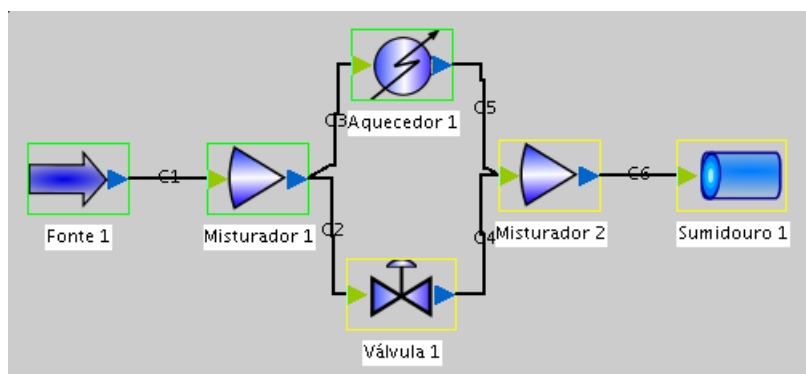


Figura 4.6: Diagrama com todas correntes observáveis.

Além da apresentação pelo diagrama, é possível ver as correntes observáveis listadas em uma tabela, clicando sobre a lista no painel de botões, onde inicialmente está selecionada a opção *Simulação*, e escolhendo *Observabilidade e Redundância*, conforme Figura 4.7, em seguida clique em \checkmark .

Um diálogo semelhante ao da Figura 4.8 será apresentado, indicando no painel superior as portas e componentes observáveis e redundantes e no painel inferior as correntes observáveis e redundantes.

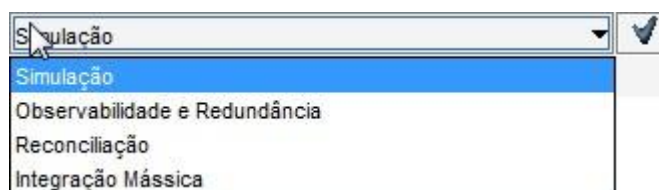


Figura 4.7: Menu de ação do diálogo de Observabilidade e Redundância.

Filtrar Dados							
Equipamento	Porta	Componente	Observável	Redundância	Configurado	Ativo	Possui
Aquecedor 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Aquecedor 1	Entrada 1	Água	sim	não	sim	não	sim
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Aquecedor 1	Saída 1	Água	sim	não	sim	não	sim
Fonte 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	sim	não	não
Fonte 1	Saída 1	Água	sim	não	sim	não	não
Misturador 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Misturador 1	Entrada 1	Água	sim	não	sim	não	sim
Misturador 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Misturador 1	Saída 1	Água	sim	não	sim	não	sim
Misturador 2	Entrada 1	Vazão total	sim	não	não	não	sim

Filtrar Dados					
Corrente	Origem	Destino	Observável	Redundância	Ativo
C7	Misturador 2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	sim	não	sim
C6	Válvula 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	sim	não	não
C4	Misturador 1 Saída 1	Válvula 1 Entrada 1	sim	não	não
C1	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1	sim	não	não
C5	Aquecedor 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	sim	não	não
C2	Misturador 1 Saída 1	Aquecedor 1 Entrada 1	sim	não	sim

Figura 4.8: Diálogo de Observabilidade e Redundância.



Dica: É possível classificar as colunas por ordem crescente ou decrescente de nome clicando na coluna em questão uma vez para crescente, duas vezes para decrescente ou três vezes para remover a classificação. É possível classificar duas colunas mantendo a tecla **Ctrl** pressionada enquanto se clica em uma segunda coluna.



Dica: É possível ainda filtrar dados em uma coluna, selecionando uma coluna e digitando parte no nome do início do texto o qual deseja-se exibir, conforme [Figura 4.9](#).

Filtrar Dados Vaz							
Equipamento	Porta	Componente	Observável	Redundância	Configura...	Ativo	Possui
Misturador 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Misturador 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Válvula 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Válvula 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Fonte 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	sim	não	não
Aquecedor 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	sim	não	sim
Sumidouro 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	sim	não	não
Misturador 2	Entrada 1	Vazão total	sim	não	não	não	sim
Misturador 2	Saída 1	Vazão total	sim	não	não	não	sim

Figura 4.9: Dica: filtrando dados.

O cálculo de observabilidade pode ser estendido ao caso de múltiplos componentes, neste caso, uma corrente só será considerada como observável se a vazão e a fração mássica de $(N - 1)$ componentes puder ser determinada.

Para adicionar novos componentes, após iniciada a construção do diagrama, basta clicar no botão `Adicionar novo componente` na barra de botões de ação à direita ou através do menu `Configurações do sistema`, sendo apresentada novamente o diálogo de adição de componentes, como visto [Figura 2.2](#).

4.2 Simulação

Esta seção visa esclarecer as idéias mais importantes para o emprego das funcionalidades de simulação. É recomendado ao usuário que compreenda estas idéias para que possa tirar pleno proveito do RecoVR.

4.2.1 Introdução

A simulação de processos é uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento, pois possibilita desde a validação de projetos, sua operabilidade prática e treinamento de operadores até aumentos de produção, redução de custos ou da geração de resíduos. Sendo assim, a simulação de processos é de suma importância tanto para o setor industrial quanto para o desenvolvimento de estudos no setor acadêmico.

Ferramentas de simulação oferecem diversas funcionalidades com aplicação na área de recursos hídricos industriais, entre elas:

- Avaliação de propagação estacionária ou dinâmica de distúrbios de vazão e composição.
 - Qualidade da água captada.
 - Qualidade da água despejada.
 - Qualidade na entrada ou saída de equipamentos de processo.
- Remoção de equipamentos para regeneração ou manutenção.
- Falhas em equipamentos de regeneração.
- Projeto de redes de reúso.
- Treinamento de operadores.

No caso do RecoVR, somente a simulação estacionária está presente, permitindo responder às seguintes perguntas:

- Como um distúrbio se propaga nos processos após atingido o estado estacionário?
 - Como a variação na qualidade da água captada se propaga?
 - O que acontece se um equipamento for removido para manutenção?
 - O que acontece com o balanço hídrico se houver variação de condições operacionais?
- Como fazer o *fechamento* de balanços de massa com reciclo?

Nesse sentido, o uso de ferramentas de simulação é importante para o engenheiro tomar decisões em relação ao balanço hídrico do processo de forma rápida e confiável.

4.2.2 Conceitos Importantes

Antes de realizar a configuração e simulação de qualquer diagrama de processos, o usuário já deve estar familiarizado com a ferramenta de detecção de observabilidade, apresentada na [Seção 4.1](#). Além disso, alguns conceitos devem ser introduzidos com o objetivo de ajudar o engenheiro à configuração apropriada da simulação, obtendo resultados rápidos e de forma robusta.

O que é *tecnicamente* uma simulação

Lembre que cada equipamento da biblioteca possui equações e variáveis. Na medida que estes são inseridos no diagrama, são adicionadas as respectivas equações e variáveis ao sistema de equações global, a ser resolvido pelo motor de cálculo.

No contexto aqui utilizado, simulação pode ser definida como um procedimento numérico ou analítico de resolução de um sistema de equações lineares ou não-lineares. No caso do RecoVR, está presente um motor de cálculo que resolve numericamente um sistema de equações algébrico não-linear, ou NLA (*non-linear algebraic system of equations*).

Matematicamente falando:

$$\begin{cases} F(x_n) = 0 \\ \text{sujeito a} \\ Limite_{inferior} \geq x_n \geq Limite_{superior} \end{cases} \quad (4.1)$$

Graus de Liberdade

Graus de liberdade de um sistema de equações revela o quão completo nosso sistema de equações se encontra e é definido da seguinte forma:

$$GL = NVar - Neqs - Npar - Nspec \quad (4.2)$$

Onde:

GL: Graus de liberdade

NVar: Número de Variáveis

Neqs: Número de Equações

NPar: Número de Parâmetros

NSpec: Número de Especificações

No caso do RecoVR temos a seguinte simplificação:

$$GL = NVar - Neqs \quad (4.3)$$

Sendo que esta informação é apresentada ao usuário na barra de status, no rodapé do programa.

Para que um diagrama possa ser simulado, seus graus de liberdade devem ser **ZERO** e para alcançar isso, é necessário adicionar medidas nas portas e/ou correntes do mesmo. Cada medida configurada no diagrama adiciona uma equação ao sistema, equilibrando assim os graus de liberdade. O procedimento para adicionar medidas foi apresentado na [Seção 4.1](#) e na [Seção 3.2](#).



Atenção: Tome cuidado para não adicionar mais medidas que o necessário, acompanhando passo-a-passo a adição das mesmas, pela barra de status. Graus de liberdade negativos indicam que o usuário adicionou mais medidas que o necessário. Caso os graus de redundância do diagrama deixem de ser zero, significa que foi inserido alguma medida em local errado. Neste caso, mesmo que os graus de liberdade sejam zero, é necessário remover todas as medidas redundantes, acompanhando até que os graus de redundância se anulem, e adicionar medidas em outros locais até alcançar zero graus de liberdade e de redundância.

Configurando Corretamente a Simulação

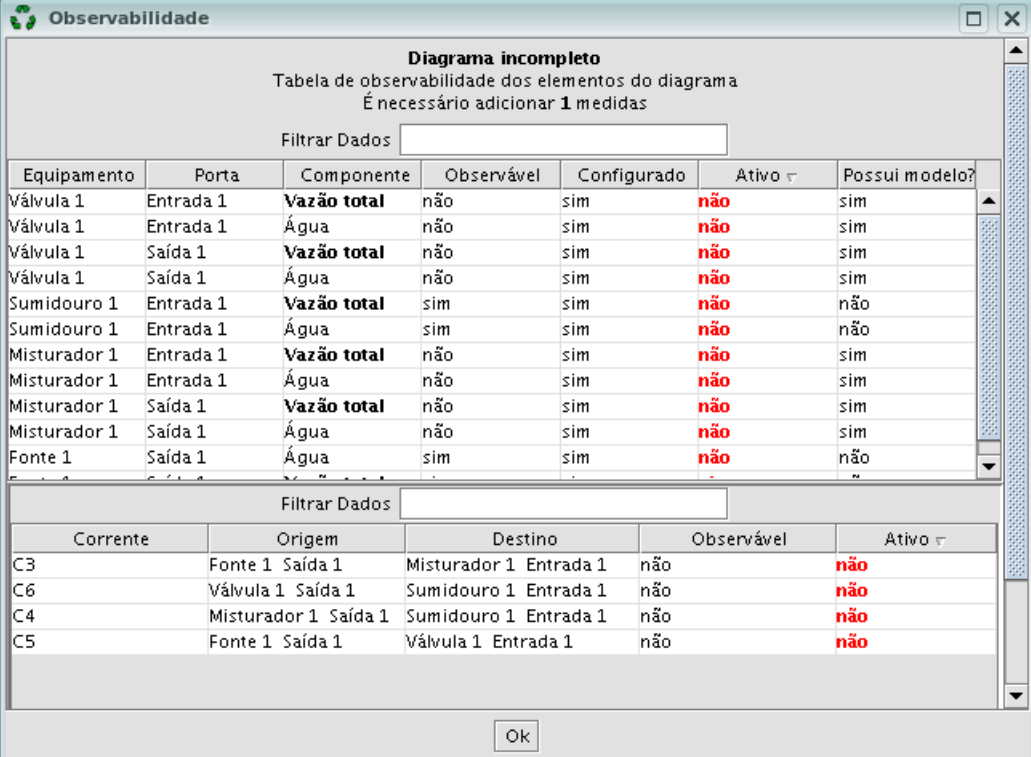
Para a configuração apropriada do diagrama de processos, sugere-se seguir os seguintes passos:

- Adicionar primeiro as medidas de vazão e composição de um mesmo equipamento, primeiro nas portas, seguido das correntes.

- Conferir os graus de liberdade após a adição de cada medida, caso resulte na existência dos graus de redundância, consulte o diálogo de observabilidade e redundância e remova uma ou mais medidas redundantes.
- Quando os graus de liberdade estiverem em **ZERO** e todas as correntes tiverem na cor **PRETA**, já é possível realizar a **simulação**.

Uma funcionalidade interessante do RecoVR é que o mesmo indica visualmente ao usuário se o diagrama está pronto para ser simulado. Quando todas as correntes estiverem na cor preta (completamente observável), os graus de liberdade zero e graus de redundância zero, o sistema está pronto para a simulação.

Caso o diagrama não esteja pronto para a simulação e o usuário tente realizar uma simulação, é apresentada a janela chamada Observabilidade, que indica quantas medidas são ainda necessárias a serem adicionadas ou removidas e quais os equipamentos e correntes candidados para tal, conforme apresentado na [Figura 4.10](#).



Observabilidade

Diagrama incompleto

Tabela de observabilidade dos elementos do diagrama
É necessário adicionar **1** medidas

Filtrar Dados

Equipamento	Porta	Componente	Observável	Configurado	Ativo ▾	Possui modelo?
Válvula 1	Entrada 1	Vazão total	não	sim	não	sim
Válvula 1	Entrada 1	Água	não	sim	não	sim
Válvula 1	Saída 1	Vazão total	não	sim	não	sim
Válvula 1	Saída 1	Água	não	sim	não	sim
Sumidouro 1	Entrada 1	Vazão total	sim	sim	não	não
Sumidouro 1	Entrada 1	Água	sim	sim	não	não
Misturador 1	Entrada 1	Vazão total	não	sim	não	sim
Misturador 1	Entrada 1	Água	não	sim	não	sim
Misturador 1	Saída 1	Vazão total	não	sim	não	sim
Misturador 1	Saída 1	Água	não	sim	não	sim
Fonte 1	Saída 1	Água	sim	sim	não	não

Filtrar Dados

Corrente	Origem	Destino	Observável	Ativo ▾
C3	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1	não	não
C6	Válvula 1 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	não	não
C4	Misturador 1 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	não	não
C5	Fonte 1 Saída 1	Válvula 1 Entrada 1	não	não

Ok

Figura 4.10: Diálogo Indicando Erros na Simulação.

No caso da [Figura 4.10](#) as portas e correntes candidatas para a adição de medidas são as *não-observáveis*, que podem ser classificadas clicando na coluna `Observável`.

4.2.3 Executando a simulação

Após a configuração apropriada da simulação, a mesma pode ser executada através do botão \checkmark , localizado na barra de botões, estando a opção `Simulação` ativa, na lista à esquerda do botão. O resultado da simulação consiste em uma tabela com os valores das vazões e composições para cada equipamento. Os resultados da simulação do diagrama multicomponentes representado na [Figura 4.11](#), encontram-se na [Figura 4.12](#).

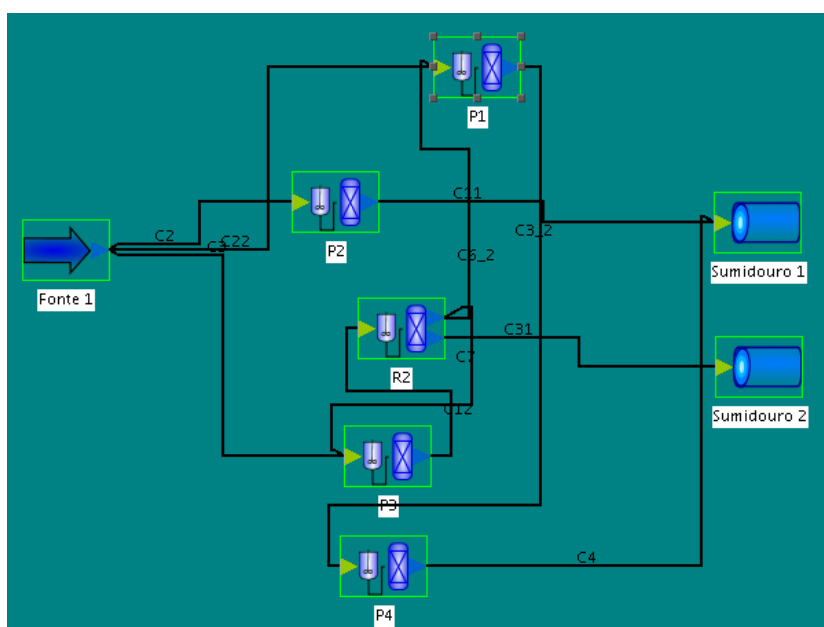


Figura 4.11: Diagrama com elevado grau de reaproveitamento.



Dica: As tabelas de resultados das simulações podem ser copiadas e coladas no Microsoft Excel© ou OpenOffice/BROffice©

Também é possível visualizar rapidamente os resultados da simulação através do *tool-tip* do equipamento, colocando o mouse por cima do mesmo. Uma caixa semelhante à [Figura 4.13](#) será exibida.

Resultados

Selecione a unidade do resultado L/s

Filtrar Dados

Equipamento	Porta	Componente	Vazão padrão	Foi fornecido?	Custo
Fonte 1	Saída 1	Vazão total	3.999,533 L/s	não	0
Fonte 1	Saída 1	water	3.993,976 L/s	não	0
Fonte 1	Saída 1	PolA	2,784 L/s	sim	0
Fonte 1	Saída 1	PolB	2,746 L/s	sim	0
P1	Entrada 1	Vazão total	1.999,703 L/s	não	0
P1	Entrada 1	water	1.997,15 L/s	não	0
P1	Entrada 1	PolA	1,302 L/s	não	0
P1	Entrada 1	PolB	1,286 L/s	não	0
P1	Saída 1	Vazão total	2.000,008 L/s	sim	0
P1	Saída 1	water	1.996,971 L/s	não	0
P1	Saída 1	PolA	1,506 L/s	não	0

Filtrar Dados Vaz

Corrente	Componente	Origem	Destino	Resultados	Foi forneci...
C11	Vazão total	P2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	2.000,014 L/s	não
C12	Vazão total	P3 Saída 1	R2 Entrada 1	2.996,018 L/s	sim
C2	Vazão total	Fonte 1 Saída 1	P2 Entrada 1	1.999,521 L/s	não
C22	Vazão total	Fonte 1 Saída 1	P1 Entrada 1	1.167,568 L/s	não
C3	Vazão total	Fonte 1 Saída 1	P3 Entrada 1	832,444 L/s	sim
C31	Vazão total	R2 Saída 2	Sumidouro 2 Entrada 1	0,111 L/s	sim
C3_2	Vazão total	P1 Saída 1	P4 Entrada 1	2.000,016 L/s	não
C4	Vazão total	P4 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	2.000,348 L/s	não
C6_2	Vazão total	R2 Saída 1	P1 Entrada 1	832,118 L/s	não
C7	Vazão total	R2 Saída 1	P3 Entrada 1	2.163,755 L/s	não

Ok

Figura 4.12: Diálogo de resultados da simulação do diagrama anterior.

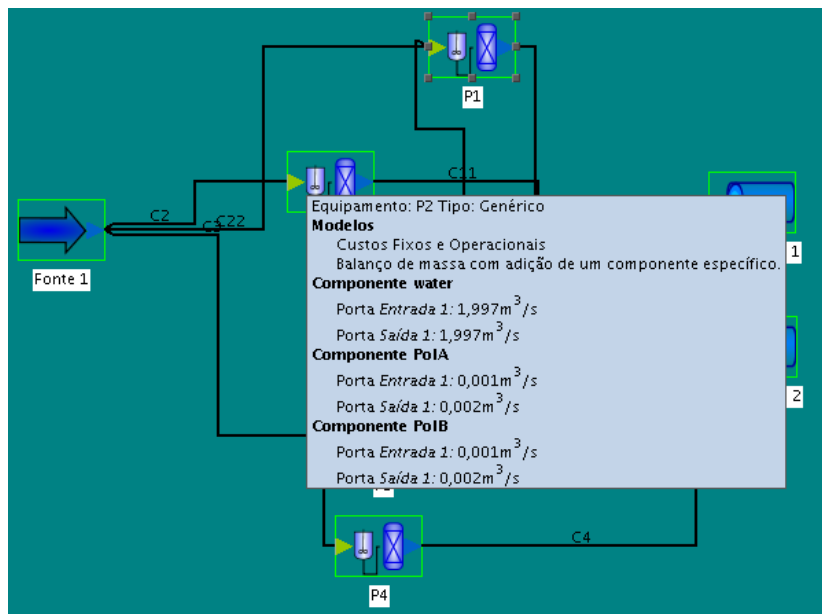


Figura 4.13: Resultados da simulação visualizado como tool-tip do equipamento.

5 Reconciliação de dados e Redundância de Medidas

Neste capítulo será apresentada a funcionalidade de reconciliação de dados e redundância do diagrama de processos. Antes de começar este capítulo é importante que o usuário já esteja familiarizado com o aplicativo, logo, é necessário que os capítulos anteriores já tenham sido lidos.

Sumário

5.1 Redundância de Correntes de Processo	43
5.2 Reconciliação de Dados	46
5.2.1 Introdução	46
5.2.2 O que é <i>tecnicamente</i> uma reconciliação de dados	46
5.2.3 Executando a Reconciliação	47

5.1 Redundância de Correntes de Processo

A definição formal de uma medição redundante é a seguinte:

Uma medição é redundante se, ao deixar de ser medida, continua sendo observável.

Para exemplificar a definição, vamos usar o mesmo diagrama apresentado na Seção 4.1, repetido na Figura 5.1 para facilitar a visualização.

Neste diagrama adicionaremos uma medida na porta de saída da Fonte 1 e uma na porta de entrada do Sumidouro 1. Podemos observar que, após este procedimento, existem 2 correntes pretas, ZERO graus de liberdade e dois graus de redundância. Isto é apresentado na barra de status no rodapé do programa, conforme Figura 5.2.

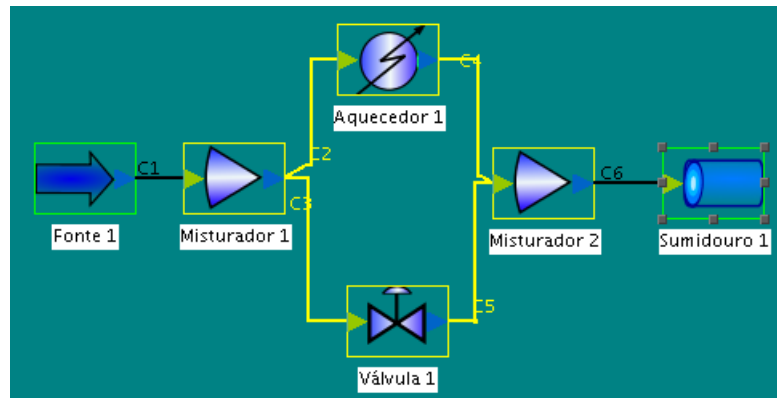


Figura 5.1: Diagrama exemplo, aquecedor com válvula de by-pass, com duas medições redundantes

Variáveis 38	Equações 38	Graus de Liberdade 0	Grau de redundância 2
--------------	-------------	----------------------	-----------------------

Figura 5.2: Status do diagrama com redundância.

Note que, como o balanço de massa não possui perdas, se removermos qualquer uma das medidas, a outra automaticamente permanece observável, indicando que ambas as medições adicionadas são redundantes.

É possível, ainda, ter medições de composição redundantes. Cabe lembrar que a Equação 5.1 realiza a soma das frações mássicas nas portas de entrada e saída, logo, se as três frações mássicas forem medidas, haverá um grau de redundância.

$$\sum_{i=1}^n X_i = 1 \quad (5.1)$$

Uma das aplicações da detecção de redundância é a alocação de medidores de forma robusta. Ou seja, com informações sobre a redundância das medidas é possível projetar uma rede de medidores, que, em caso de alguma falha, torne a vazão ou composição da corrente ainda observável.

É possível listar as correntes redundantes, clicando no botão de ação e escolhendo Observabilidade e Redundância, conforme [Figura 5.3](#), em seguida clique em \checkmark .

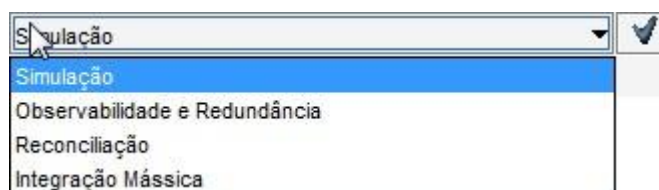


Figura 5.3: Menu de ação do diálogo de Observabilidade e Redundância.

Um diálogo semelhante ao da [Figura 5.4](#) será apresentado, indicando no painel superior as portas e componentes observáveis e redundantes e no painel inferior as correntes observáveis e redundantes.

Redundância

Diagrama incompleto
Tabela de redundância dos elementos do diagrama
É necessário remover **uma** ou mais medidas

Filtrar Dados

Equipamento	Porta	Componente	Observável	Redundância	Configurado	Ativo	Po
Sumidouro 1	Entrada 1	Vazão total	sim	sim	sim	sim	...
Fonte 1	Saída 1	Vazão total	sim	sim	sim	sim	...
Aquecedor 1	Entrada 1	Vazão total	não	não	não	não	...
Aquecedor 1	Entrada 1	Água	não	não	não	não	...
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão total	não	não	não	não	...
Aquecedor 1	Saída 1	Água	não	não	não	não	...
Misturador 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Misturador 1	Entrada 1	Água	sim	não	não	não	...
Misturador 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Misturador 1	Saída 1	Água	sim	não	não	não	...
Sumidouro 1	Entrada 1	Água	sim	não	sim	não	...

Filtrar Dados

Corrente	Origem	Destino	Observável	Redundância	Ativo
C5	Válvula 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	não	não	não
C2	Misturador 1 Saída 1	Aquecedor 1 Entrada 1	não	não	não
C1	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1	sim	não	não
C4	Aquecedor 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	não	não	não
C6	Misturador 2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	sim	não	não
C3	Misturador 1 Saída 1	Válvula 1 Entrada 1	não	não	não

OK

Figura 5.4: Diálogo de Observabilidade e Redundância.



Dica: É possível classificar as colunas por ordem crescente ou decrescente de nome clicando na coluna em questão uma vez para crescente, duas vezes para decrescente ou três vezes para remover a classificação. É possível classificar duas ou mais colunas mantendo a tecla `Ctrl` pressionada enquanto se clica nas colunas.



Dica: É possível ainda filtrar dados em uma coluna, selecionando uma coluna e digitando parte no nome do início do texto o qual deseja-se exibir, conforme [Figura 5.5](#).

Redundância

Diagrama incompleto
Tabela de redundância dos elementos do diagrama
É necessário remover **uma** ou mais medidas

Filtrar Dados: Vaz

Equipamento	Porta	Componente	Observável	Redundân...	Configurado	Ativo	Po
Sumidouro 1	Entrada 1	Vazão total	sim	sim	sim	sim	...
Fonte 1	Saída 1	Vazão total	sim	sim	sim	sim	...
Aquecedor 1	Entrada 1	Vazão total	não	não	não	não	...
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão total	não	não	não	não	...
Misturador 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Misturador 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Misturador 2	Entrada 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Misturador 2	Saída 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Válvula 1	Entrada 1	Vazão total	não	não	não	não	...
Válvula 1	Saída 1	Vazão total	não	não	não	não	...

Filtrar Dados:

Corrente	Origem	Destino	Observável	Redundância	Ativo
C5	Válvula 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	não	não	não
C2	Misturador 1 Saída 1	Aquecedor 1 Entrada 1	não	não	não
C1	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1	sim	não	não
C4	Aquecedor 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	não	não	não
C6	Misturador 2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	sim	não	não
C3	Misturador 1 Saída 1	Válvula 1 Entrada 1	não	não	não

Ok

Figura 5.5: Filtrando dados da vazão total no diálogo de observabilidade e redundância.

5.2 Reconciliação de Dados

É comum que medições de vazões e composições de processos industriais não sejam perfeitas. Desta forma, acabam apresentando valores conflitantes, não respeitando o balanço de massa. Para contornar tal problema, o RecoVR oferece uma ferramenta avançada, a **Reconciliação de Dados**.

5.2.1 Introdução

Em muitos processos onde se dispõe de um sistema de medição, observa-se que o balanço de massa não é respeitado exatamente. Por exemplo: os valores obtidos da vazão total de massa que entra em um equipamento não correspondem à vazão total de saída. Isso acontece pois, como todo equipamento industrial, os sensores de medição estão sujeitos à oscilações ou falhas. Isso pode ocorrer por diversos motivos, entre eles:

- Oscilação aleatória (ruído branco) do circuito eletrônico que realiza a medição.
- Variações nas condições climáticas (temperatura, umidade, etc) que interferem na precisão de determinados equipamentos de medição.
- Falta de calibração e/ou manutenção periódica no medidor.
- Medidor estragado.
- Vazamento em algum equipamento ou corrente.

Para amenizar essas imperfeições nos balanços de massa existe uma técnica conhecida como **Reconciliação de Dados**. Tal técnica consiste em ajustes nos valores das medições de forma que as mesmas respeitem o balanço de massa e/ou composição. Também pode ser incluído no problema informações a respeito da precisão dos medidores, de forma que estes ajustes sejam maiores em medidores com menor precisão (ou menos confiáveis).

Com tal técnica é possível detectar os balanços que não estão sendo respeitados e ainda detectar equipamentos e correntes sujeitos a vazamentos.

5.2.2 O que é *tecnicamente* uma reconciliação de dados

Na reconciliação de dados é resolvido um problema matemático de otimização. Isto significa que técnicas especiais de cálculo irão variar os valores das medidas de vazões e/ou composições, buscando satisfazer os balanços de massa com o menor erro possível

em relação aos dados inseridos pelo usuário. Este problema de otimização pode ser escrito da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x_n} \sum_{i=1}^n w_i \cdot (y_i - x_i)^2 \\ 0 \leq x_n \leq x_{nmax} \\ \text{sujeito a} \\ h(x_n) = 0 \end{array} \right. \quad (5.2)$$

onde:

$h(x_n)$: Restrições impostas pelo balanço de massa

w_i : Pesos ou precisões dos medidores

y_i : Vazões medidas

x_i : Vazões ajustadas

Lembre que cada equipamento da biblioteca possui variáveis e equações, e, na medida que estes são inseridos no diagrama, inserem as variáveis e equações no mesmo, formando o sistema de equações a ser resolvido pelo motor de cálculo.

No caso do RecoVR, as restrições impostas pelos balanços são os próprios modelos dos equipamentos, onde as mesmas já são contempladas. As precisões dos medidores são determinadas ao se especificar uma medida, tendo por padrão o valor unitário caso o usuário não entre com essa informação.

Cabe ressaltar que as precisões dos medidores podem ser absolutas, obtidas através do fabricante, ou relativas, onde é dada uma escala de confiabilidade ao medidor conforme a experiência do usuário.

Com informações de medições e das precisões fornecidas pelo usuário, o RecoVR monta internamente uma problema de otimização e resolve através de seu motor de cálculo.

5.2.3 Executando a Reconciliação

Para que seja possível realizar a reconciliação de dados, é necessário que exista redundância entre as medidas que se deseja reconciliar. Para configurar medições redundantes, consulte a [Seção 5.1](#).



Atenção: Não é necessário se preocupar com os graus de liberdade para executar uma reconciliação de dados, estes podem ser maior, menor ou igual a zero. É necessário somente que os graus de **redundância** sejam **MAIORES** que **ZERO**.

Para fins de exemplo, foi considerado o diagrama previamente apresentado na [Figura 5.1](#). Neste problema, um número redundante de medições foi configurado entre as portas de saída da *Fonte 1*, entrada e saída do *Aquecedor 1* e *Válvula 1* e entrada do *Sumidouro 1*, sendo os valores apresentados na [Tabela 5.1](#).

Note que ao configurar as medidas apresentadas na [Tabela 5.1](#), os graus de liberdade passam a ser negativos e a redundância do

Tabela 5.1: Exemplo de reconciliação de dados.

Porta	Real	Medida	Reconciliada
Fonte Saída	100	101.91	100.25
Aquecedor Entrada	65	64.45	64.5
Válvula Entrada	35	34.65	35.72
Aquecedor Saída	65	64.20	64.5
Válvula Saída	35	36.44	35.72
Sumidouro Entrada	100	98.88	100.25

sistema passa para 24, conforme apresentado na [Figura 5.6](#).

Variáveis 38	Equações 42	Graus de Liberdade -4	Grau de redundância 24
--------------	-------------	-----------------------	------------------------

Figura 5.6: Status do diagrama a ser reconciliado.



Dica: Vale lembrar que as medições podem ser adicionadas a portas e a correntes.

Após a configuração apropriada das medições, a reconciliação pode ser selecionada na lista de opções do painel de botões e executada através do botão \checkmark . O resultado da reconciliação consiste em uma tabela com os valores das vazões e composições para cada equipamento. A reconciliação do diagrama representado através da [Figura 5.1](#), encontra-se na [Figura 5.7](#).

Também é possível classificar e filtrar os resultados apresentados, sendo particularmente útil na reconciliação de dados para, por exemplo, classificar somente correntes medidas e filtrar somente as vazões totais, conforme [Figura 5.8](#).



Dica: Lembre-se que para classificar os dados clique na coluna uma vez para ascendente, duas vezes para descendente e três vezes para desclassificar. Para filtrar as linhas, selecione uma coluna e escreva o texto a ser filtrado na caixa de texto `Filtrar Dados` dos equipamentos ou correntes.

Resultados

Selecione a vazão L/s

Filtrar Dados

Equipame...	Porta	Componente	Medida	Valor Reconc...	Redundante?	Foi Inserido?	Custo
		Vazão Total	64,45 L/s	64,5 L/s	Sim	Sim	0
Aquecedor 1	Entrada 1	Água		64,5 L/s	Não	Não	0
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão Total	64,2 L/s	64,5 L/s	Sim	Sim	0
Aquecedor 1	Saída 1	Água		64,5 L/s	Não	Não	0
Fonte 1	Saída 1	Vazão Total	101,91 L/s	100,22 L/s	Sim	Sim	0
Fonte 1	Saída 1	Água		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 1	Entrada 1	Vazão Total		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 1	Entrada 1	Água		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 1	Saída 1	Vazão Total		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 1	Saída 1	Água		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 2	Entrada 1	Vazão Total		100,22 L/s	Não	Não	0

Filtrar Dados

Corrente	Componente	Origem	Destino	Medida	Valor Reconcil...	Redundante?	Foi ...
C5	Vazão Total	Válvula 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1		35,72 L/s	Não	Não
C5	Água	Válvula 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1		35,72 L/s	Não	Não
C2	Vazão Total	Misturador 1 Saída 1	Aquecedor 1 Entrada 1		64,5 L/s	Não	Não
C2	Água	Misturador 1 Saída 1	Aquecedor 1 Entrada 1		64,5 L/s	Não	Não
C1	Vazão Total	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1		100,22 L/s	Não	Não
C1	Água	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1		100,22 L/s	Não	Não
C4	Vazão Total	Aquecedor 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1		64,5 L/s	Não	Não
C4	Água	Aquecedor 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1		64,5 L/s	Não	Não
C6	Vazão Total	Misturador 2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1		100,22 L/s	Não	Não
C6	Água	Misturador 2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1		100,22 L/s	Não	Não
C3	Vazão Total	Misturador 1 Saída 1	Válvula 1 Entrada 1		35,72 L/s	Não	Não

Ok

Figura 5.7: Resultados da reconciliação.

Note que a diferença entre a vazão medida e a reconciliada, denominada *ajuste*, é um bom indicativo do status do medidor, sendo possível usar esse dado para detectar problemas no medidor ou mesmo algum vazamento: quanto maior o ajuste, maior a probabilidade de existir algum problema no sistema de medição/equipamento.



Dica: As tabelas de resultados das reconciliações podem ser copiadas e coladas no Microsoft Excel© ou OpenOffice/BROffice©.

Resultados

Selecione a vazão L/s

Filtrar Dados Va

Equipamento	Porta	Componente	Medida	Valor Reconciliado	Redundante?	Foi Inserido?	Custo
Sumidouro 1	Entrada 1	Vazão Total	98,88 L/s	100,22 L/s	Sim	Sim	0
Aquecedor 1	Entrada 1	Vazão Total	64,45 L/s	64,5 L/s	Sim	Sim	0
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão Total	64,2 L/s	64,5 L/s	Sim	Sim	0
Válvula 1	Saída 1	Vazão Total	36,44 L/s	35,72 L/s	Sim	Sim	0
Válvula 1	Entrada 1	Vazão Total	34,65 L/s	35,72 L/s	Sim	Sim	0
Fonte 1	Saída 1	Vazão Total	101,91 L/s	100,22 L/s	Sim	Sim	0
Misturador 1	Entrada 1	Vazão Total		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 1	Saída 1	Vazão Total		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 2	Entrada 1	Vazão Total		100,22 L/s	Não	Não	0
Misturador 2	Saída 1	Vazão Total		100,22 L/s	Não	Não	0

Filtrar Dados Vaz

Corrente	Componen...	Origem	Destino	Medida	Valor Reconcili...	Redundante?	Foi ...
C5	Vazão Total	Válvula 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1		35,72 L/s	Não	Não
C2	Vazão Total	Misturador 1 Saída 1	Aquecedor 1 Entrada 1		64,5 L/s	Não	Não
C1	Vazão Total	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1		100,22 L/s	Não	Não
C4	Vazão Total	Aquecedor 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1		64,5 L/s	Não	Não
C6	Vazão Total	Misturador 2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1		100,22 L/s	Não	Não
C3	Vazão Total	Misturador 1 Saída 1	Válvula 1 Entrada 1		35,72 L/s	Não	Não

Ok

Figura 5.8: Resultados da reconciliação com classificação das medições.

Também é possível visualizar rapidamente os resultados das reconciliações através do *tool-tip* do equipamento, colocando o mouse por cima do mesmo, uma caixa semelhante à [Figura 5.9](#) será exibida.

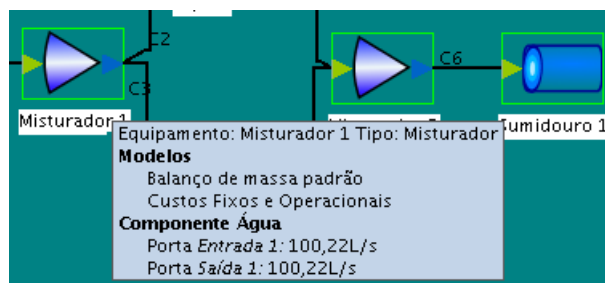


Figura 5.9: Resultados da reconciliação visualizado como *tool-tip* do equipamento.

É possível ainda, reconciliar um diagrama com um número menor de medidas. Para ilustrar tal caso, o exemplo anterior será modificado, desativando as medidas das portas de entrada e saída do *Aquecedor 1* e *Válvula 1*.



Dica: Para desativar a medida basta clicar no *checkbox* desta, removendo a marcação. O valor da medida será mantido na janela de propriedades porém não será considerado nos cálculos.

Lembre que, para a reconciliação, não é necessário se preocupar com os graus de liberdade.

Neste caso, haverá redundância somente nas medidas da porta de saída da *Fonte 1* e porta de entrada do *Sumidouro 1*.

Tal observação pode ser comprovada acionando o diálogo de Observabilidade e Redundância, sendo o mesmo apresentado na [Figura 5.10](#).

O resultado da reconciliação é apresentado na [Figura 5.11](#)

Percebe-se que alguns valores não medidos foram reconciliados. É importante destacar que tais resultados não possuem significado, uma vez que a sua referência também é resultado do cálculo sobre as restrições. Portanto, estes valores devem ser desprezados, **somente medidas redundantes podem ser reconciliadas** e possuem significado matemático.

Redundância

Diagrama incompleto
Tabela de redundância dos elementos do diagrama
É necessário remover **uma** ou mais medidas

Filtrar Dados

Equipamento	Porta	Componente	Observável	Redundância	Configurado	Ativo	Po
Sumidouro 1	Entrada 1	Vazão total	sim	sim	sim	sim	...
Fonte 1	Saída 1	Vazão total	sim	sim	sim	sim	...
Aquecedor 1	Entrada 1	Vazão total	não	não	não	não	...
Aquecedor 1	Entrada 1	Água	não	não	não	não	...
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão total	não	não	não	não	...
Aquecedor 1	Saída 1	Água	não	não	não	não	...
Misturador 1	Entrada 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Misturador 1	Entrada 1	Água	sim	não	não	não	...
Misturador 1	Saída 1	Vazão total	sim	não	não	não	...
Misturador 1	Saída 1	Água	sim	não	não	não	...
Sumidouro 1	Entrada 1	Água	sim	não	sim	não	...

Filtrar Dados

Corrente	Origem	Destino	Observável	Redundância	Ativo
C5	Válvula 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	não	não	não
C2	Misturador 1 Saída 1	Aquecedor 1 Entrada 1	não	não	não
C1	Fonte 1 Saída 1	Misturador 1 Entrada 1	sim	não	não
C4	Aquecedor 1 Saída 1	Misturador 2 Entrada 1	não	não	não
C6	Misturador 2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	sim	não	não
C3	Misturador 1 Saída 1	Válvula 1 Entrada 1	não	não	não

Ok

Figura 5.10: Diálogo de Observabilidade e Redundância: somente 2 medições.

Resultados

Selecione a vazão L/s

Filtrar Dados

Equipamento	Porta	Componente	Medida	Valor Reconciliado	Redundante?
Sumidouro 1	Entrada 1	Vazão Total	98,88 L/s	100,395 L/s	Sim
Fonte 1	Saída 1	Vazão Total	101,91 L/s	100,395 L/s	Sim
Aquecedor 1	Entrada 1	Vazão Total		44 L/s	Não
Aquecedor 1	Saída 1	Vazão Total		44 L/s	Não
Misturador 1	Entrada 1	Vazão Total		100,395 L/s	Não
Misturador 1	Saída 1	Vazão Total		100,395 L/s	Não
Misturador 2	Entrada 1	Vazão Total		100,395 L/s	Não
Misturador 2	Saída 1	Vazão Total		100,395 L/s	Não
Válvula 1	Entrada 1	Vazão Total		56,395 L/s	Não
Válvula 1	Saída 1	Vazão Total		56,395 L/s	Não

Figura 5.11: Resultados da reconciliação: somente 2 medições.

6 Projeto de Redes de Reúso de Água

Neste capítulo serão apresentados os recursos do RecoVR para projetos de redes de reúso de água. Antes de começar este capítulo é importante que o usuário já esteja familiarizado com o aplicativo, logo, é necessário que os capítulos anteriores já tenham sido lidos.

Sumário

6.1	Introdução	54
6.2	Levantando limites operacionais	55
6.3	O que é <i>tecnicamente</i> um projeto de redes de reúso	57
6.4	Executando o projeto de redes de reúso	58
6.5	Projeto de Redes de Reúso: Dicas	68
6.6	Projeto de Redes de Reúso: Configurações Avançadas	70

6.1 Introdução

O projeto de redes de reúso de água consiste em determinar a melhor forma de reaproveitar/reusar a água efluente dos equipamentos de processo.

Existem grande ganhos quando se realiza o reúso de águas industriais, pois, as legislações ambientais encontram-se cada vez mais rígidas. [12, Valle 2006] apresentou casos onde ferramentas de reúso de água foram utilizadas, sendo os potenciais de redução apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Potenciais de ganho com a aplicação de ferramentas de reúso de águas industriais.

Fonte	Área	Insumo	Economia(%)
[3, Fontana]	Teórico	Água	89
[4, Farenzena]	Curtumes	Água	69
[5, Raghava]	Curtumes	Água e Insumos	60% de água e 24% de insumos
[6, Mann e Liu]	Petroquímica	Água	17
[8, El-Halwagi 1989]	Petroquímica	Água	58
[7, El-Halwagi 1997]	Petroquímica	Água	60
[9, Wang e Smith]	Teórico	Água	58
[10, Gomes]	Teórico	Água	37

Além da economia direta com a redução do consumo de água, existem outros potenciais de ganhos indiretos com a aplicação de tais técnicas, entre eles:

- Viabilização de ampliação de unidades e construção de novas indústrias;
- Marketing Ambiental (valorização da marca);
- Preocupação social crescente com temas ambientais;
- Legislação ambiental mais rígida.

Uma das principais dificuldade para implementação de ferramentas de reúso de água é a ausência ou escassez de informações a respeito dos balanços hídricos industriais. Nas demais ferramentas já existentes, estas informações são indispensáveis.

O projeto de redes de reúso de água parte de princípio que diversas informações dos equipamentos do circuito de uso de água industrial são conhecidos, entre elas:

- 1 Vazão operacional de cada equipamento (máxima e mínima).
- 2 Concentração mássica mínima e máxima dos poluentes nas entradas e saídas dos equipamentos.
- 3 Vazão mássica mínima e máxima permitida na entrada dos equipamentos.
- 4 Custos de novas conexões.
- 5 Custos de bombeamento entre as conexões novas e existentes.
- 6 Vazão e concentração máxima admitida no despejo.

Geralmente, para fazer a implementação de redes de reúso e levantamento de dados, é seguida uma ordem sistemática, que consiste em:

- 1 Coleta de dados.
- 2 Validação através de reconciliação ou detecção de erros.
- 3 Estimação de correntes não medidas com simulações.
- 4 Alocação de novos medidores
- 5 Retornar ao passo 1, 2, 3 ou 4, se necessário.
- 6 Montar a tabela de oportunidades
- 7 Projeto de redes de reúso

Estima-se que 90% do tempo gasto para a implementação de uma rede de reaproveitamento de água é no levantamento de dados. Nesse sentido, o RecoVR fornece uma série de ferramentas para coletar de forma sistemática tais informações e validá-las com simulações, detecção de observabilidade, redundância e reconciliação de dados.

6.2 Levantando limites operacionais

Vale recordar que, quando se realiza um projeto de redes de reúso, geralmente se deseja a redução no consumo de água do processo como um todo. Considerando que as cargas de geração de poluentes são fixas por uma propriedade do balanço de massa, as correntes efluentes dos equipamentos serão mais concentradas em contaminantes. Se a água efluente de um equipamento altamente concentrada for reaproveitada em outra unidade, poderão haver problemas operacionais. Logo, existe um compromisso entre a

redução no consumo de água e a viabilidade técnica de reaproveitamento de correntes. Esse é um dos principais fatos que torna o projeto de redes de reúso de água uma tarefa complexa.

Para que seja possível o reaproveitamento, deve-se ter conhecimento que concentração dos componentes (poluentes, por exemplo) na entrada dos equipamentos é permitida, de forma que o mesmo não seja comprometido.

Sempre que se fala em reúso deve-se pensar: Qual a pior água que meu equipamento pode aceitar sem comprometer sua operabilidade?

Para determinar os limites operacionais dos equipamentos, tanto quanto à vazão como à composição, podem ser utilizados os seguintes métodos:

- Uso de dados históricos.
- Uso da experiência da equipe de engenharia.
- Dados de projeto/fabricante do equipamento.
- Uso de ferramentas computacionais, como o RecoVR.

No caso da concentração mássica mínima e máxima na entrada dos equipamentos, podemos determiná-la considerando:

- Solubilidade máxima do poluente.
- Limite de corrosão (para o caso de componentes inorgânicos).
- *Fouling* ou deposição.
- Mínimo gradiente de concentração para a transferência de massa.
- Máxima concentração de entrada para os processos a jusante.

Com todas as informações agrupadas, é possível realizar o projeto de redes de reúso/reaproveitamento de águas, apresentado nas próximas seções.

6.3 O que é tecnicamente um projeto de redes de reúso

O projeto de redes de reúso de água pode ser posto como um problema de otimização, que é resolvido por técnicas especiais de cálculo. Este problema de otimização é escrito da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x_n} \sum_{i=1}^n w_i \cdot C_i \cdot x_i \\ \text{sujeito a} \\ g(x_n) \geq 0 \\ h(x_n) = 0 \end{array} \right. \quad (6.1)$$

onde:

w_i : Pesos (importância).

C_i : Custos das novas conexões.

x_i : Vazões.

$g(x_n)$: Limites operacionais.

$h(x_n)$: Restrições de balanço de massa.

Com informações fornecidas pelo usuário, o RecoVR monta internamente um problema de otimização e envia para um motor de cálculo específico. Após a resolução, os resultados são colocados no diagrama gráfico para a visualização.

Mais especificamente para o caso do RecoVR, o problema de otimização é escrito da seguinte forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x_n} \gamma_1 \sum_{i=1}^n w_i \cdot CF_i \cdot x_i + \\ \gamma_2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot CVar_i \cdot x_i + \\ \gamma_3 Fr_i + \\ \gamma_4 Efl_i \\ \text{sujeito a} \\ g(x_n) \geq 0 \\ h(x_n) = 0 \end{array} \right. \quad (6.2)$$

onde:

γ_i : Pesos (importância) relativos para os termos da otimização.

w_i : Pesos (importância) para os custos.

CF_i : Custos das novas conexões (fixos).

$CVar_i$: Custos variáveis (bombeamento ou proporcional à vazão).

Fr_i : Vazão de água proveniente dos equipamentos do tipo *Fonte* (água fresca).

Efl_i : Vazão de água proveniente dos equipamentos do tipo *Su- midouro* (efluente).

x_i : Vazões.

$g(x_n)$: Limites operacionais.

$h(x_n)$: Restrições de balanço de massa.

Lembre que cada equipamento da biblioteca possui variáveis e equações, e, a medida que estes são inseridos no diagrama, inserem as variáveis e equações no mesmos, formando assim o sistema de equações a ser resolvido pelo motor de cálculo de otimização.

No caso do RecoVR, os valores dos pesos são obtidos através das configurações das medidas inseridas pelo usuário. As restrições impostas pelos balanços são os próprios modelos dos equipamentos, onde as mesmas já são contempladas. As restrições operacionais (vazões e composições máxima e mínima na entrada e saída dos equipamentos) e os custos das conexões são inseridas pelo usuário na forma de tabelas, como sera visto na [Seção 6.4](#).

De posse destas informações operacionais, juntamente com as informações de medições e das precisões fornecidas pelo usuário na configuração do diagrama, o RecoVR monta internamente um problema de otimização e o resolve através de um motor de cálculo específico.

6.4 Executando o projeto de redes de reúso

Para que seja possível realizar o projeto de redes de reúso, é necessário que o usuário tenha previamente adicionado os equipamentos ao diagrama e conectado todas suas portas. No caso de um projeto não existente o usuário ainda assim deve fazer tal procedimento, que servirá de ponto de partida da análise pelo RecoVR, que avaliará a necessidade de mudanças nas conexões das correntes.



Dica: Quando maior o número e a qualidade das informações existente, maior e mais robusta será a qualidade dos resultados obtidos com o projeto de redes de reúso. Realize diversas simulações e validações dos balanços antes de preencher os limites operacionais dos mesmos e, se possível, valide-os com dados de planta.

O usuário pode ainda colocar medidas de vazão e composição, porém deve-se ter cuidado com tal procedimento, pois o mesmo dificulta a solução numérica do problema. Neste caso, sugere-se colocar uma restrição de limite superior igual ao limite inferior, ao invés de uma medida.

Para inserir os custos operacionais e as restrições do diagrama, é necessário acionar a funcionalidade de *Integração Mássica*, localizado na lista do painel de botões, seguida do botão \checkmark , sendo que esta ação irá gerar a seguinte janela:

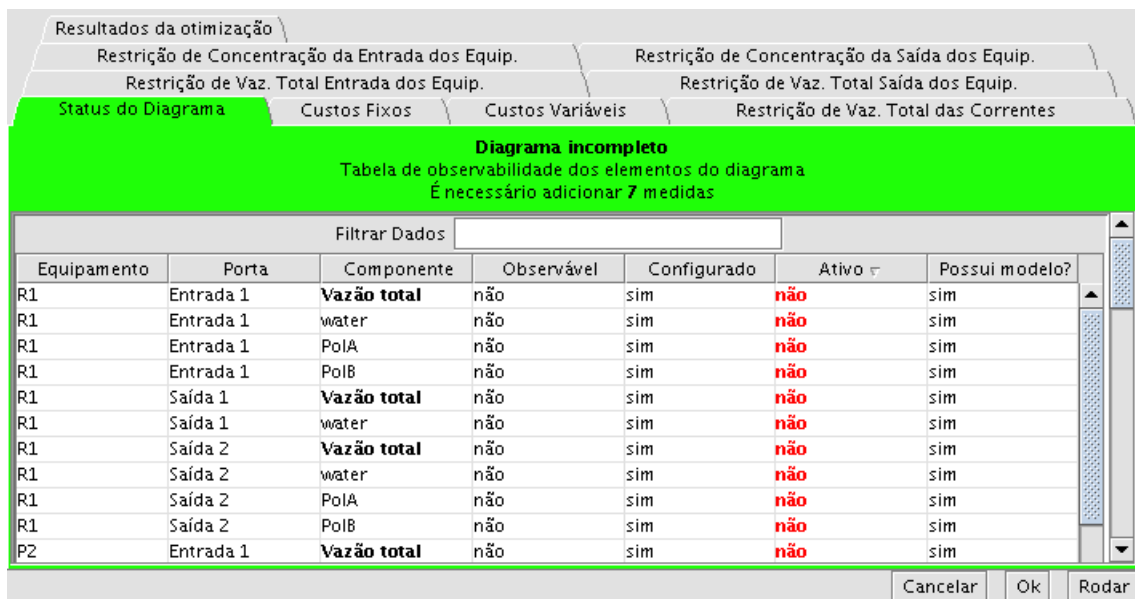


Figura 6.1: Janela de Integração de Processos: Status do diagrama.

A janela apresentada na Figura 6.1 é composta por diversas abas:

- Status do diagrama: semelhante ao diálogo de observabilidade e redundância, para o usuário obter algumas informações do diagrama antes de configurar os parâmetros.
- Custos fixos: usada para configurar os custos de novas conexões.
- Custos variáveis: usada para configurar os custos variáveis (proporcional à vazão) de novas conexões.
- Restrição de vazão total das correntes: Restrição de vazão máxima e mínima das novas conexões ou correntes atuais.
- Restrição de vazão total de entrada dos equipamentos: Vazão máxima e mínima de entrada dos equipamentos.
- Restrição de vazão total de saída dos equipamentos: Vazão máxima e mínima de saída dos equipamentos.
- Restrição de concentração de entrada dos equipamentos: Concentração máxima e mínima de entrada dos equipamentos para cada um dos poluentes.
- Restrição de concentração de saída dos

equipamentos: Concentração máxima e mínima de saída dos equipamentos para cada um dos poluentes.

- Resultados da otimização: Aba para acompanhamento dos resultados numéricos do motor de cálculo *Ipopt*.



Dica: As tabelas de configuração podem ser copiadas e coladas de/para o Microsoft Excel© ou OpenOffice/BROffice©

Após o usuário conferir o status do diagrama em questão, é necessário que sejam preenchidas as demais abas de configuração.

Na aba de custos fixos é apresentada uma tabela para configuração destes. Nesta tabela, as portas de saída dos equipamento são apresentados nas colunas, enquanto que as portas de entrada dos equipamentos são apresentadas nas linhas. Para configurar o custo fixo da conexão de uma nova corrente entre a saída do equipamento *P1* e a entrada do equipamento *P3*, a célula destacada em verde deve ser preenchida, conforme [Figura 6.2](#).



Atenção: Os valores nas tabelas são inseridas em unidades do SI: para custo, $USD.s/m^3$; para vazão, m^3/s ; para composição, fração mássica.

Resultados da otimização										
Restrição de Concentração da Entrada dos Equip.					Restrição de Concentração da Saída dos Equip.					
Restrição de Vaz. Total Entrada dos Equip.					Restrição de Vaz. Total Saída dos Equip.					
Status do Diagrama	Custos Fixos			Custos Variáveis		Restrição de Vaz. Total das Correntes				
	Fonte 1	Saída 1	P1 Saída 1	P2 Saída 1	P3 Saída 1	P4 Saída 1	R1 Saída 1	R1 Saída 2	R2 Saída 1	R2 Saída 2
P1 Entrada 1	0		0	70	50	90	75	0	35	0
P2 Entrada 1	0		10	0	30	50	35	0	75	0
P3 Entrada 1	0		50	90	0	70	55	0	15	0
P4 Entrada 1	0		30	50	10	0	15	0	55	0
R1 Entrada 1	0		75	35	55	15	0	0	70	0
R2 Entrada 1	0		35	75	15	55	10	0	0	0
Sumidouro 1 Entrada 1	10		0	0	0	0	0	0	0	0
Sumidouro 2 Entrada 1	10		0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.2: Janela de Integração de Processos: Configuração dos custos fixos.

De forma, semelhante à aba de configuração dos custos fixos, os custos variáveis (proporcionais à vazão dos processos), é configurada na próxima aba, conforme [Figura 6.3](#). Nesta é destacado em

cinza o custo variável da conexão de uma nova corrente entre a saída do equipamento *P1* e a entrada do equipamento *P2*.

Resultados da otimização									
Restrição de Concentração da Entrada dos Equip.					Restrição de Concentração da Saída dos Equip.				
Restrição de Vaz. Total Entrada dos Equip.					Restrição de Vaz. Total Saída dos Equip.				
Status do Diagrama	Custos Fixos		Custos Variáveis			Restrição de Vaz. Total das Correntes			
	Fonte 1 Saída 1	P1 Saída 1	P2 Saída 1	P3 Saída 1	P4 Saída 1	R1 Saída 1	R1 Saída 2	R2 Saída 1	R2 Saída 2
P1 Entrada 1	0	0	70	50	90	75	0	35	0
P2 Entrada 1	0	10	0	30	50	35	0	75	0
P3 Entrada 1	0	50	90	0	70	55	0	15	0
P4 Entrada 1	0	30	50	10	0	15	0	55	0
R1 Entrada 1	0	75	35	55	15	0	0	70	0
R2 Entrada 1	0	35	75	15	55	10	0	0	0
Sumidouro 1 Entrada 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sumidouro 2 Entrada 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0

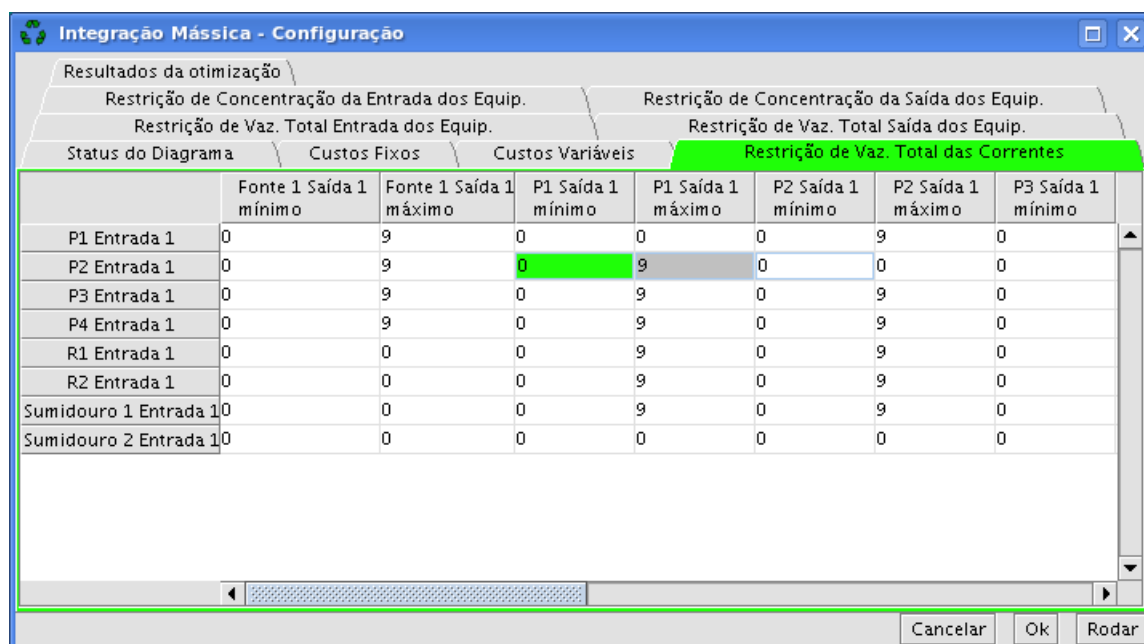
Figura 6.3: Janela de Integração de Processos: Configuração dos custos variáveis.

Na próxima aba o usuário configura os limites máximo e mínimo para a vazão das novas conexões. De forma semelhante à configuração dos custos, nesta tabela, as vazões máxima e mínima das portas de saída dos equipamentos são apresentadas nas colunas, enquanto que as portas de entrada dos equipamentos são apresentadas nas linhas. A principal diferença é que, para cada porta de cada equipamento, o usuário deve configurar uma vazão máxima e mínima.

Na [Figura 6.4](#) é apresentada uma tabela de configuração das vazões máximas e mínimas, onde destacado em verde está a configuração da vazão mínima de saída do equipamento *P1* e entrada no equipamento *P2*; em cinza a vazão máxima de saída do equipamento *P1* e entrada no equipamento *P2*.

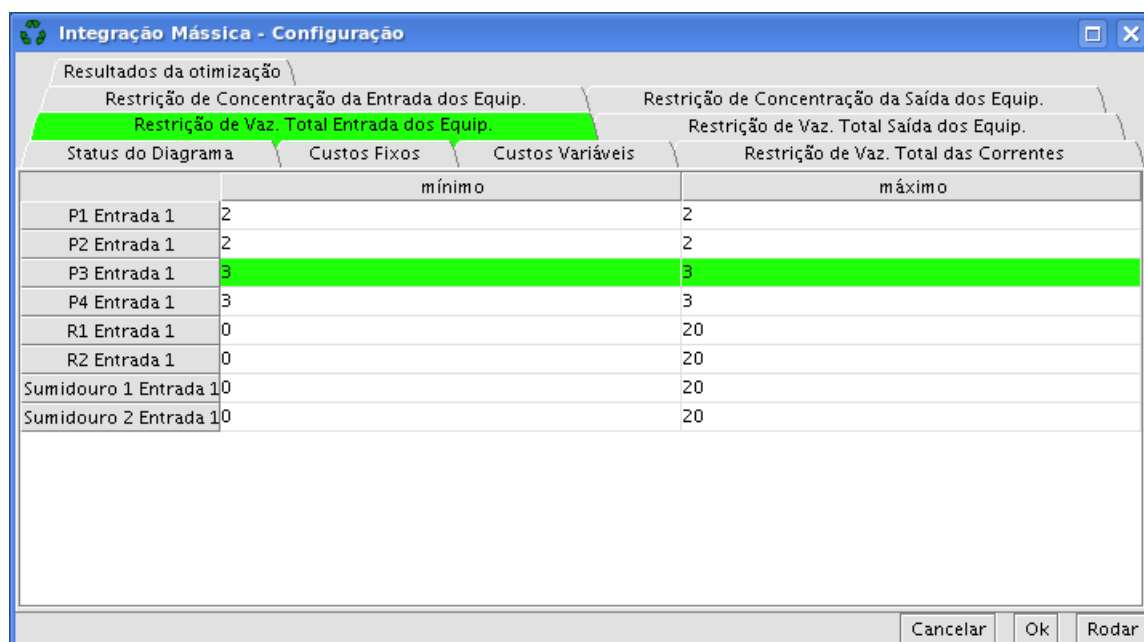
Caso o usuário deseje inibir a possibilidade de conexão entre determinados equipamentos, basta inserir ambos valores **MÁXIMO** e **MÍNIMO IGUAL a ZERO**.

Caso já exista uma conexão e o usuário deseje que esta não possa ser removida, deve colocar seu valor **MÍNIMO MAIOR** que **ZERO**.



Status do Diagrama	Custos Fixos		Custos Variáveis		Restrição de Vaz. Total das Correntes		
	Fonte 1 Saída 1 mínimo	Fonte 1 Saída 1 máximo	P1 Saída 1 mínimo	P1 Saída 1 máximo	P2 Saída 1 mínimo	P2 Saída 1 máximo	P3 Saída 1 mínimo
P1 Entrada 1	0	9	0	0	0	9	0
P2 Entrada 1	0	9	0	9	0	0	0
P3 Entrada 1	0	9	0	9	0	9	0
P4 Entrada 1	0	9	0	9	0	9	0
R1 Entrada 1	0	0	0	9	0	9	0
R2 Entrada 1	0	0	0	9	0	9	0
Sumidouro 1 Entrada 1	0	0	0	9	0	9	0
Sumidouro 2 Entrada 1	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.4: Janela de Integração de Processos: Configuração das vazões máximas e mínimas entre todos os equipamentos do diagrama.



Status do Diagrama	Custos Fixos		Custos Variáveis		Restrição de Vaz. Total das Correntes		
	mínimo		máximo				
P1 Entrada 1	2			2			
P2 Entrada 1	2			2			
P3 Entrada 1	3			3			
P4 Entrada 1	3			3			
R1 Entrada 1	0			20			
R2 Entrada 1	0			20			
Sumidouro 1 Entrada 1	0			20			
Sumidouro 2 Entrada 1	0			20			

Figura 6.5: Janela de Integração de Processos: Configuração das vazões máximas e mínimas na entrada dos equipamentos.

Outra configuração possível é a definição de valores máximo e mínimo para a vazão na entrada dos equipamentos. Esta tabela é mais simples que as demais, conforme apresentado na [Figura 6.5](#), onde a vazão máxima e mínima na entrada do equipamento *P3* é configurada (destacado em verde).

Tem-se também a configuração de valores máximo e mínimo para a vazão na saída dos equipamentos, de forma semelhante à anterior. Na [Figura 6.6](#) se configura a vazão máxima e mínima no equipamento *Fonte 1* (destacado em verde), lembrando que fontes são equipamentos que contém apenas saída.



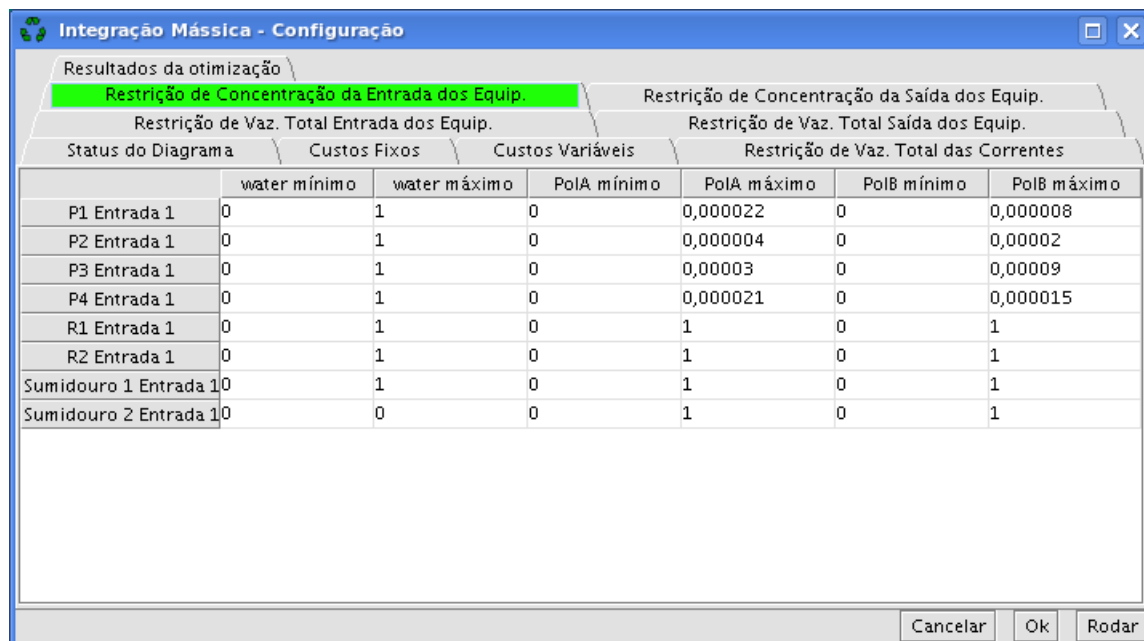
Dica: Esta é uma maneira de se definir um limite máximo para a vazão que entra no processo, o que influenciará no seu grau de integração: quanto menos água for permitida, maior será o número de novas conexões.

Restrição de Vaz. Total Saída dos Equip.		Restrição de Vaz. Total das Correntes	
Status do Diagrama	Custos Fixos	Custos Variáveis	Restrição de Vaz. Total das Correntes
	mínimo		máximo
Fonte 1 Saída 1	0	1	
P1 Saída 1	0	20	
P2 Saída 1	0	20	
P3 Saída 1	0	20	
P4 Saída 1	0	20	
R1 Saída 1	0	20	
R1 Saída 2	0	20	
R2 Saída 1	0	20	
R2 Saída 2	0	20	

Figura 6.6: Janela de Integração de Processos: Configuração das vazões máximas e mínimas na saída dos equipamentos.

Conforme comentado na [Seção 6.2](#), a determinação dos limites mínimos e máximos das concentrações nas entradas dos equipamentos são importantes para determinar a rede de reaproveitamento. Esta configuração está disponível na aba *Restrição da Concentração de Entrada dos Equipamentos*, apresentada na [Figura 6.7](#). As concentrações são alimentadas nesse diálogo através das frações mássicas.

Embora um pouco menos comum, existe também a possibilidade



Status do Diagrama	Custos Fixos		Custos Variáveis		Restrição de Vaz. Total das Correntes	
	water mínimo	water máximo	PoA mínimo	PoA máximo	PoB mínimo	PoB máximo
P1 Entrada 1	0	1	0	0,000022	0	0,000008
P2 Entrada 1	0	1	0	0,000004	0	0,000002
P3 Entrada 1	0	1	0	0,000003	0	0,000009
P4 Entrada 1	0	1	0	0,000021	0	0,000015
R1 Entrada 1	0	1	0	1	0	1
R2 Entrada 1	0	1	0	1	0	1
Sumidouro 1 Entrada 1	0	1	0	1	0	1
Sumidouro 2 Entrada 1	0	0	0	1	0	1

Figura 6.7: Janela de Integração de Processos: Configuração das concentrações máximas e mínimas na entrada dos equipamentos.

de configurar os limites mínimos e máximos das concentrações nas saídas dos equipamentos, conforme [Figura 6.8](#).

Após os limites da nova rede propriamente configurados, é possível projetar uma rede de reúso de água, clicando no botão Rodar na parte inferior esquerda da janela de configuração. Em seguida a aba Resultados da Otimização será ativada, mostrando o andamento da otimização e alguns resultados numéricos da otimização, conforme [Figura 6.9](#).

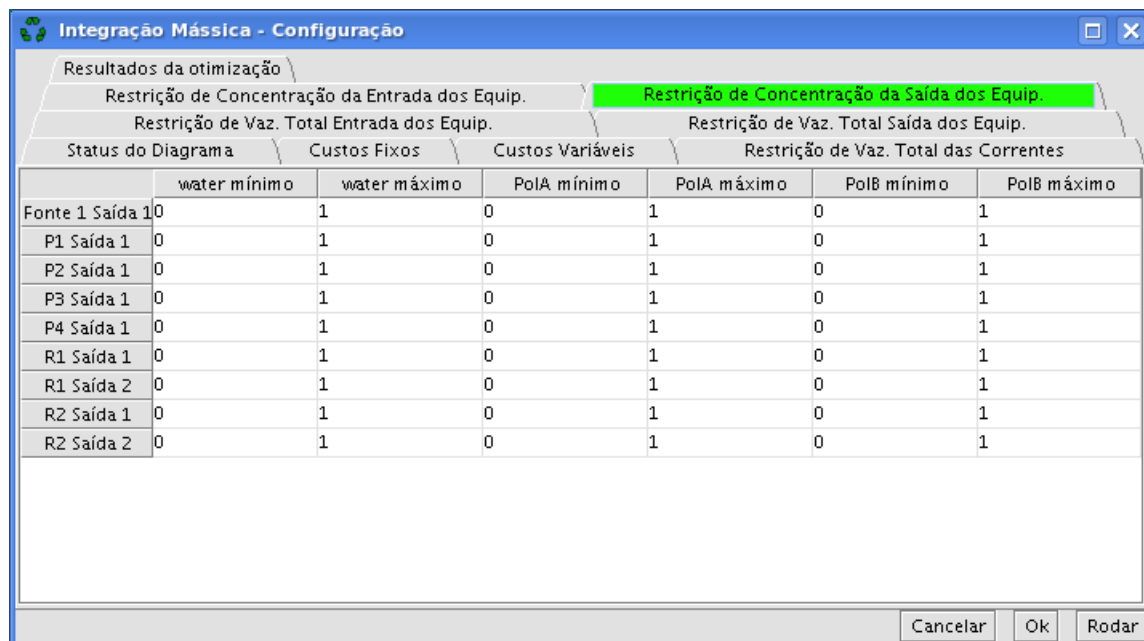


Figura 6.8: Janela de Integração de Processos: Configuração das concentrações máximas e mínimas na saída dos equipamentos.

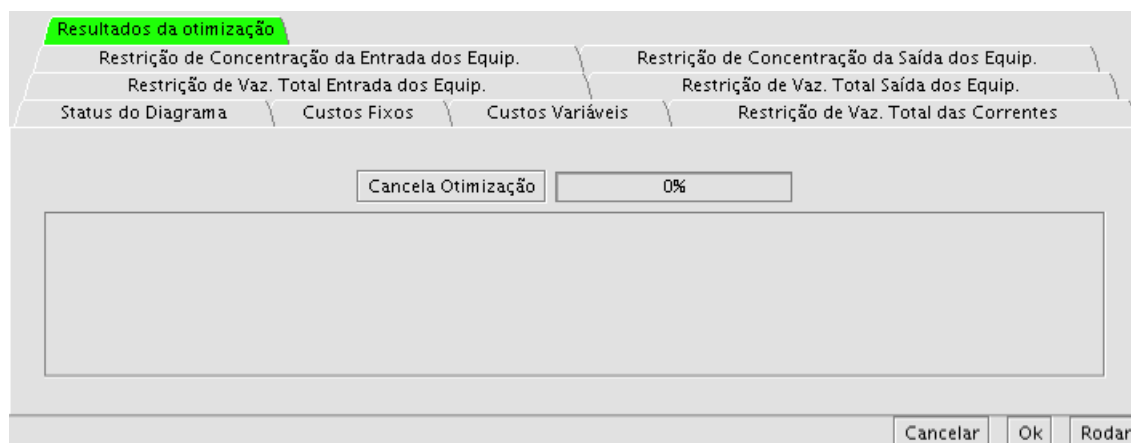


Figura 6.9: Janela de Integração de Processos: Motor de cálculo executando a otimização.

Após finalizada a otimização com sucesso, será apresentada uma diálogo semelhante ao apresentado na [Figura 6.10](#)

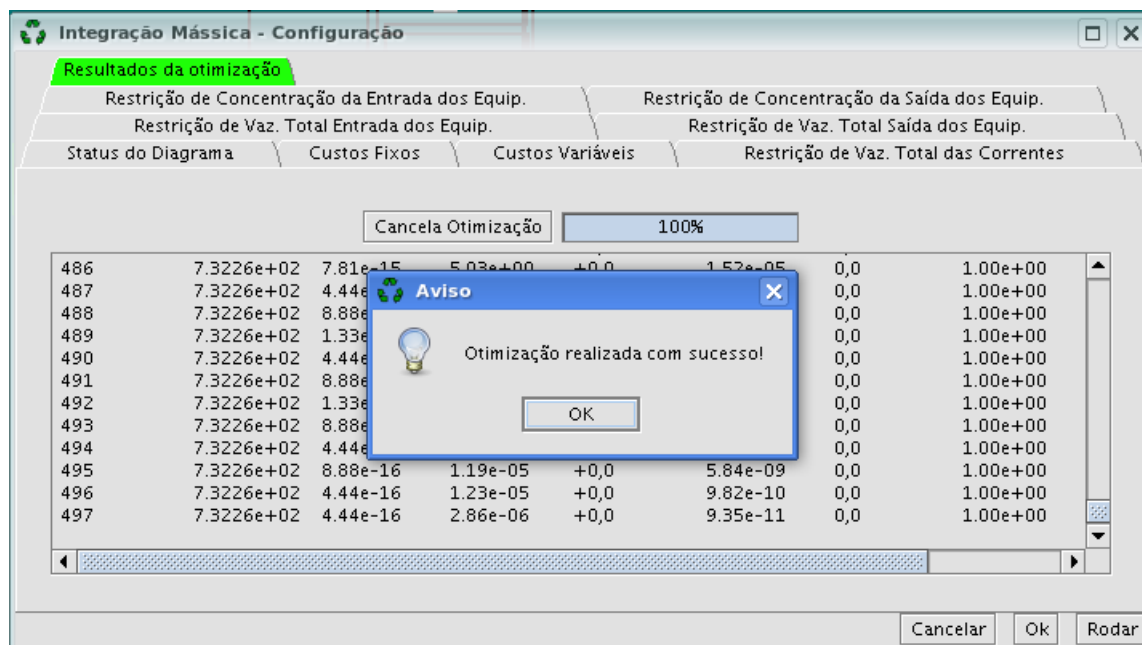


Figura 6.10: Janela de Integração de Processos: Otimização finalizada com sucesso.

O resultado final de uma otimização é uma janela de diálogo de simulação, indicando, no painel superior, as vazões totais e por componentes de todas as portas e as vazões totais e por componentes para cada uma das correntes, conforme [Figura 6.11](#). As novas correntes são automaticamente adicionadas e/ou removidas no diagrama, sendo que as novas medidas de vazões e composições são adicionadas ao diagrama de forma a fechar seus graus de liberdade e não torná-lo redundante. Nesse sentido o usuário poderá ver novamente as vazões e composições de portas e correntes, selecionando novamente a opção *Simulação* na lista do painel de botões e clicando em \checkmark .



Atenção: Salve sempre o diagrama resultante com um nome diferente, pois o diagrama original não poderá ser revertido!

Resultados

Selecione a unidade do resultado L/s

Filtrar Dados

Equipamento	Porta	Componente	Vazão padrão	Foi fornecido?	Custo
Fonte 1	Saída 1	Vazão total	5.000 L/s	não	0
Fonte 1	Saída 1	water	4.999,96 L/s	não	0
Fonte 1	Saída 1	PolA	0,02 L/s	sim	0
Fonte 1	Saída 1	PolB	0,02 L/s	sim	0
P1	Entrada 1	Vazão total	2.000 L/s	não	0
P1	Entrada 1	water	1.999,984 L/s	não	0
P1	Entrada 1	PolA	0,008 L/s	não	0
P1	Entrada 1	PolB	0,008 L/s	não	0
P1	Saída 1	Vazão total	2.000,024 L/s	sim	0
P1	Saída 1	water	1.999,984 L/s	não	0
P1	Saída 1	PolA	0,023 L/s	não	0

Filtrar Dados

Corrente	Componente	Origem	Destino	Resultados	Foi fornecido?
C0	Vazão total	P4 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	3.000,052 L/s	não
C0	water	P4 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	2.999,909 L/s	não
C0	PolA	P4 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	0,094 L/s	não
C0	PolB	P4 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	0,049 L/s	não
C1	Vazão total	P1 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	0,067 L/s	não
C1	water	P1 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	0,067 L/s	não
C1	PolA	P1 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	0 L/s	não
C1	PolB	P1 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	0 L/s	não
C11	Vazão total	P2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	2.000,26 L/s	não
C11	water	P2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	1.999,984 L/s	não
C11	PolA	P2 Saída 1	Sumidouro 1 Entrada 1	0,05 L/s	não

Ok

Figura 6.11: Janela de Integração de Processos: Resultados numéricos da otimização.

6.5 Projeto de Redes de Reúso: Dicas

O projeto de redes de reúso envolve cálculos de otimização através de motores de cálculo externos (IPOPT [1, Wächter 2002], [2, Wächter 2006]). Nessa seção, algumas dicas são listadas para garantir que a otimização seja executada com sucesso.

Troque medidas por limites inferiores e superiores.

Matematicamente, a troca de medidas por limites inferiores e superiores facilita a resolução numérica. Logo, sugere-se remover, por exemplo, uma medida de composição e inseri-la nas restrições de composição na entrada ou saída de um equipamento.

Por exemplo: Uma medida de fração mássica do componente *PolA* de 0,004 na entrada do equipamento *P1*, pode ser desativada e substituída no diálogo de configuração, na aba de Restrição de Concentração na Entrada de Equipamentos, colocando tanto o limite inferior de concentração quanto o limite superior como 0,004, conforme [Figura 6.12](#). O mesmo procedimento pode ser aplicado para vazões.

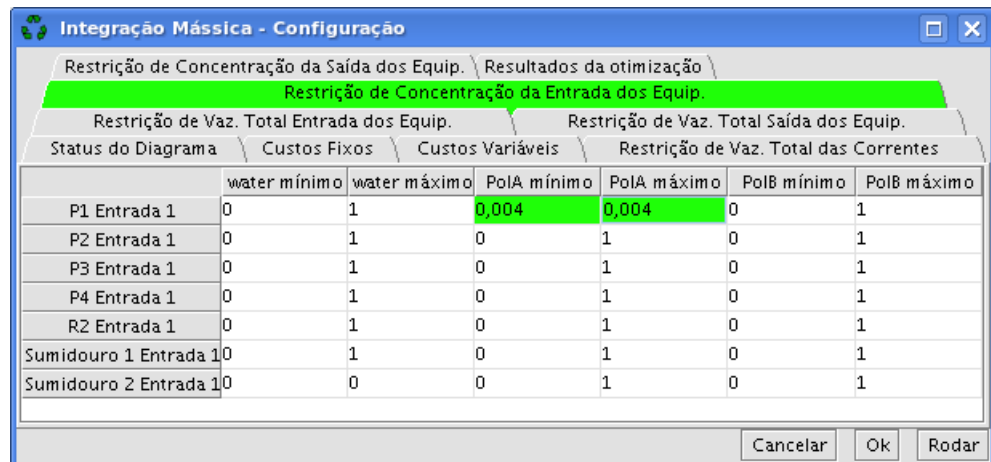


Figura 6.12: Janela de Integração de Processos: Substituindo medidas por limites de concentração.

Relaxe algumas restrições.

Restrições rígidas, como:

$$2 \leq Vazao \leq 2$$

são mais difíceis de serem resolvidas, procure deixar os limites mais relaxados se isto for possível no seu sistema real.

Atenção nas Unidades de Medição.

Internamente o RecoVR trabalha com unidades do Sistema Internacional (SI), sendo que na janela de configuração de integração de processos, todas as unidades devem ser alimentadas nessas unidades. As cargas mássicas e medidas dos equipamentos também possuem unidades e devem ser respeitadas. No caso de um sistema real, onde as vazões aquosas estão em unidades mássicas, por exemplo em toneladas por hora, esta deve ser convertida para seu equivalente volumétrico, ou seja m^3/s . Na grande maioria dos casos esta conversão pode ser feita considerando uma massa específica constante, sem afetar significativamente os cálculos.

Compreendendo os motores de cálculo.

Leia a seção de configuração avançada dos motores de cálculo, [Seção 7.2](#), elas ajudarão a resolver problemas de convergência da otimização.

Documente bem os resultados.

Devido a facilidade de gerar resultados e a característica do problema de otimização envolvido, o usuário pode gerar diversos resultados (diagramas) diferentes com pequenas modificações nas restrições, custos ou medições. Uma dica importante é que o usuário documente bem tais modificações para que saiba as diferenças entre os arquivos resultantes.

Sempre salve seus trabalhos.

O RecoVR ainda não possui um sistema de desfazer (ou *undo*) ou salvamento automático implementado, logo, sugere-se que os mesmos sejam periodicamente salvos.

6.6 Projeto de Redes de Reúso: Configurações Avançadas

Para o usuário com maiores conhecimentos de métodos numéricos ou com problemas de convergência, estão disponíveis opções avançadas de configuração, apresentadas na [Seção 7.2](#).

O problema de projeto de redes de reúso original, conforme apresentado na literatura consiste em modelos matemáticos não lineares contemplando variáveis reais (contínuas), como vazão e composição, e variáveis binárias (sim ou não, 0 ou 1), referentes à existência ou não de conexões entre os equipamentos. Tal problema com variáveis inteiras e contínuas é conhecido como problema de otimização não-linear inteira-mista, ou MINLP, de difícil resolução numérica.

Conforme apresentado no trabalho de [11, Valle 2005], o problema MINLP pode ser simplificado, eliminando as variáveis binárias. Para isso, se modifica a função objetivo fazendo com que as variáveis contínuas, como as vazões, incorporem o comportamento binário desejado (ligado ou desligado). Nesse sentido, o problema sofre um pré-tratamento antes de ser enviado aos motores de cálculo externos.

Relembrando o problema de otimização de projeto de redes de reúso:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{x_n} \gamma_1 \sum_{i=1}^n w_i \cdot CF_i \cdot x_i + \\ \gamma_2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot CVar_i \cdot x_i + \\ \gamma_3 Fr_i + \\ \gamma_4 Efl_i + \\ \text{sujeito a} \\ g(x_n) \geq 0 \\ h(x_n) = 0 \end{array} \right. \quad (6.3)$$

Onde:

γ_i : Pesos (importância) relativos para os termos da otimização.

w_i : Pesos (importância) para os custos.

CF_i : Custos das novas conexões (fixos).

$CVar_i$: Custos variáveis (bombeamento ou proporcional à vazão).

Fr_i : Vazão de água proveniente dos equipamentos do tipo *Fonte* (água fresca).

Efl_i : Vazão de água proveniente dos equipamentos do tipo *Su- midouro* (efluente).

x_i : Vazões.

$g(x_n)$: Limites operacionais.

$h(x_n)$: Restrições de balanço de massa.

Na equação anterior, $CF_i.x_i$, é substituído por:

$$\frac{\tanh(200(x_i - 0.02)) + 1}{2} \quad (6.4)$$

Onde o termo x_i representa a vazão de uma nova conexão. Tal ação faz com que a vazão tenha comportamento conforme apresentado na [Figura 6.13](#).

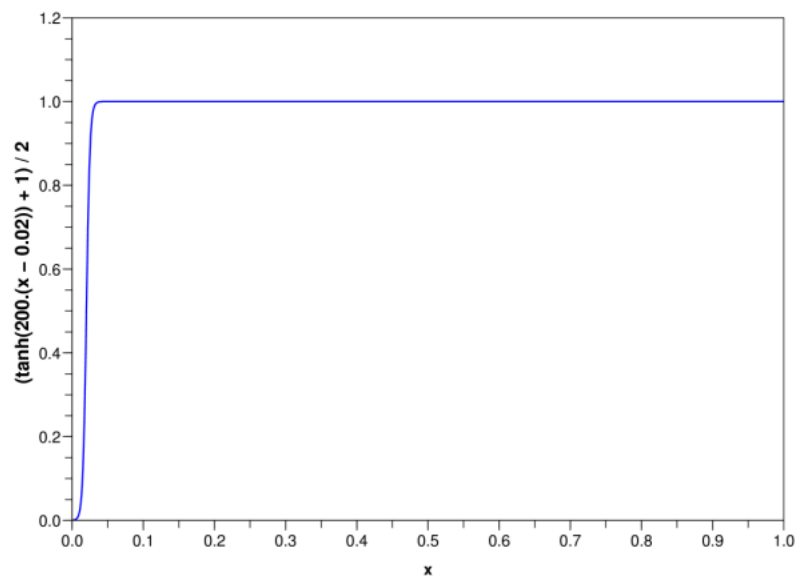


Figura 6.13: Comportamento da equação $\frac{\tanh(200(x_i-0.02))+1}{2}$

Ou seja, para vazões menores que $0,01$, o termo não é considerado no custo, enquanto que para vazões maiores que $0,03$, o termo é considerado no custo, fazendo papel semelhante a uma variável binária, porém sem elevar a complexidade do problema de otimização.

O usuário pode também configurar pesos relativos aos demais termos da função objetivo, alterando os valores de γ_i . Por exemplo, se o custo de novas conexões é muito relevante ao problema de projeto, este pode ser aumentado em relação aos demais. Se for desejado priorizar a minimização do uso de água ou do descarte de efluentes, tais termos devem ter seus valores relativamente maiores que os outros.

Parâmetros de configuração do motor de cálculo.

A janela de configuração do motor de cálculo utilizado na resolução do problema de otimização pode ser vista na [Figura 6.14](#). Esta pode ser acessada através da interface do RecoVR pela opção `Configurar parâmetros` dentro do menu `Configurações do sistema` e selecionando a aba `NLPMassSolver`.



Atenção: Os valores no argumento da tangente hiperbólica já foram previamente ajustados e otimizados. Sugere-se que os mesmos não sejam modificados.

Dentre os parâmetros de configuração do motor de cálculo, temos o `Cut_flow`, ou fator de corte, que descarta novas correntes com vazões menores que este valor.

Para facilitar a depuração e resolução do problema, está disponível a função `Random_Initial_Guess`, que conecta todas as correntes e gera chutes iniciais para as vazões ao invés de usar os valores padrões de vazões e composições. Tal opção pode ser utilizada para resolver um problema que não possui solução viável.

Outro parâmetro que também pode ajudar a resolução do problema é o `Solve_first_a_feasible_NLP`, que resolve um problema de otimização somente com os balanços, adicionando posteriormente a função objetivo.

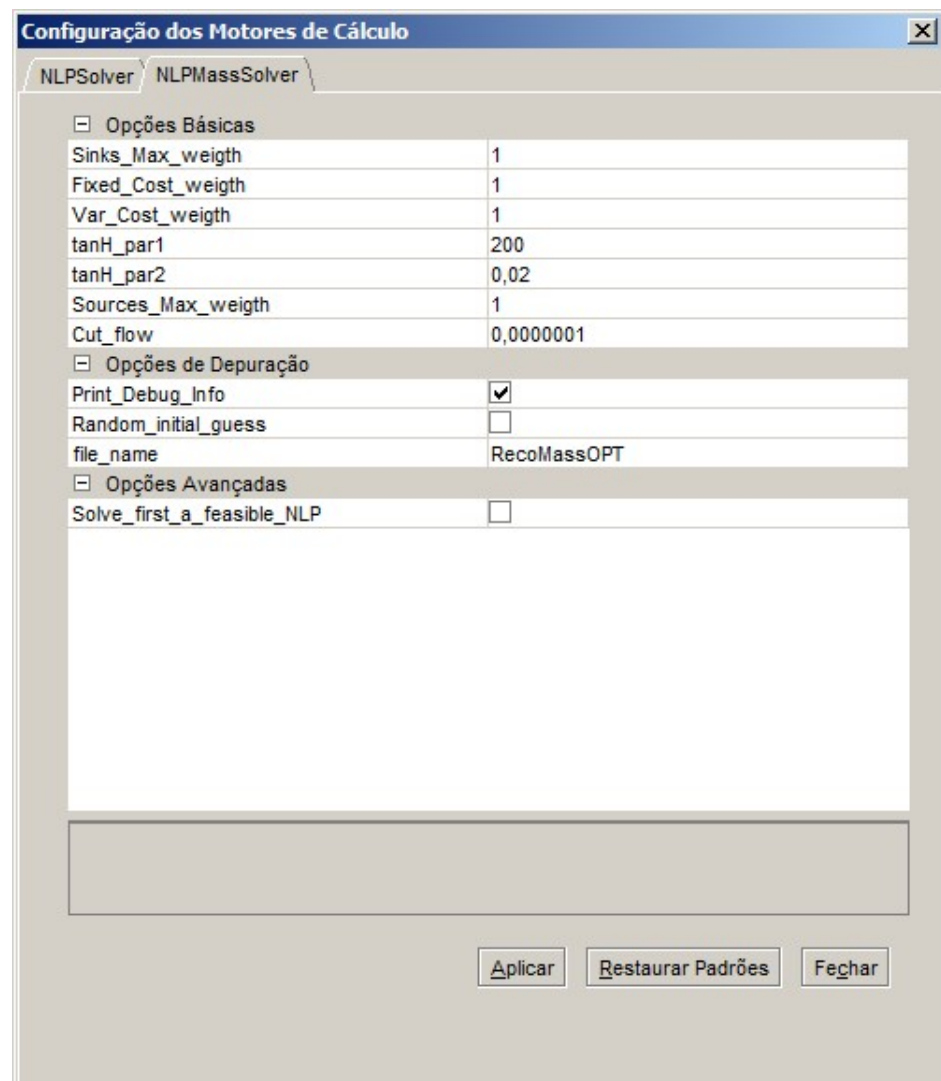


Figura 6.14: Opções do motor de cálculo de integração de processos.

7 Opções

Neste capítulo são apresentadas as opções visuais e referentes aos motores de cálculo do RecoVR. As opções visuais influenciam apenas na apresentação do diagrama de processos. As configurações dos motores de cálculo afetam os resultados, podendo melhorar ou mesmo comprometer a convergência das ferramentas do RecoVR — simulação, reconciliação ou integração mássica.

Sumário

7.1 Opções Visuais	75
7.2 Motores de cálculo	78
7.2.1 Motor de cálculo de otimização: NLP Solver	79
7.2.2 Motor de cálculo de integração de processos: NLP Mass Solver	83

7.1 Opções Visuais

Para que o usuário possa personalizar a apresentação do diagrama de processos, uma série de opções visuais estão disponíveis. Estas podem ser acessadas através do menu Configurações Visuais (Figura 7.1), entre elas:

- Exibir a ponta da seta no equipamento de destino; Figura 7.2.
- Estilo da seta, Figura 7.3 e Figura 7.4;
- Quebrar corrente ou todas as correntes na metade de seu segmento;
- Selecionar a cor de fundo do diagrama, Figura 7.5;
- Mudar o idioma das janelas, Figura 7.6.

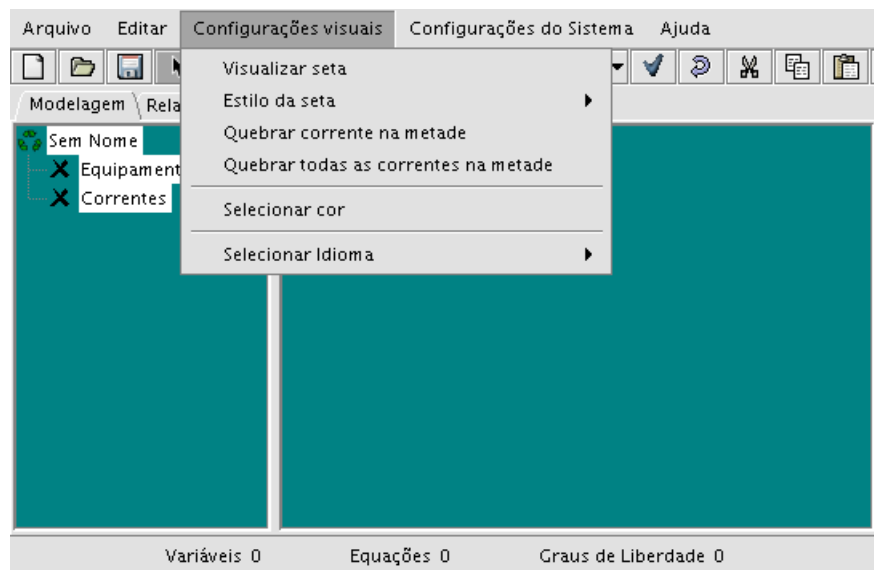


Figura 7.1: Menu de opções visuais.

Uma das opções visuais oferecidas é o estilo da seta utilizada para demonstrar a direção das conexões do diagrama. Um exemplo do efeito desta alteração é mostrado a seguir.

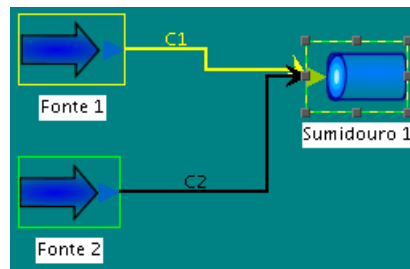


Figura 7.2: Visualizando a ponta da seta.

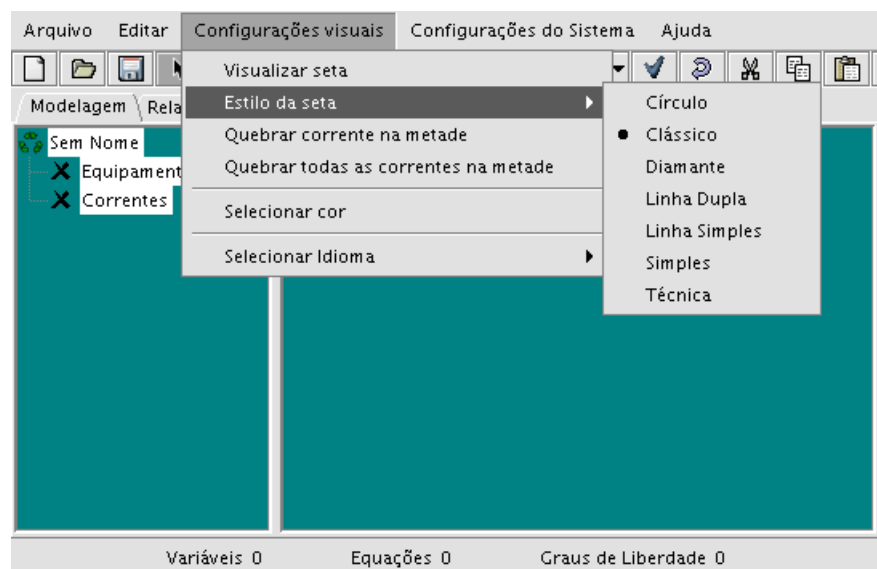


Figura 7.3: Mudando estila da seta pelo menu.

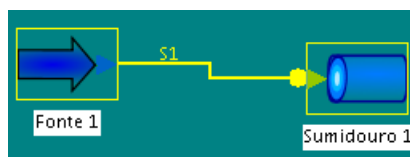


Figura 7.4: Estilo de seta em círculo.

Ainda é possível alterar a cor do fundo da área de desenho do diagrama de processos e o idioma da interface do RecoVR.

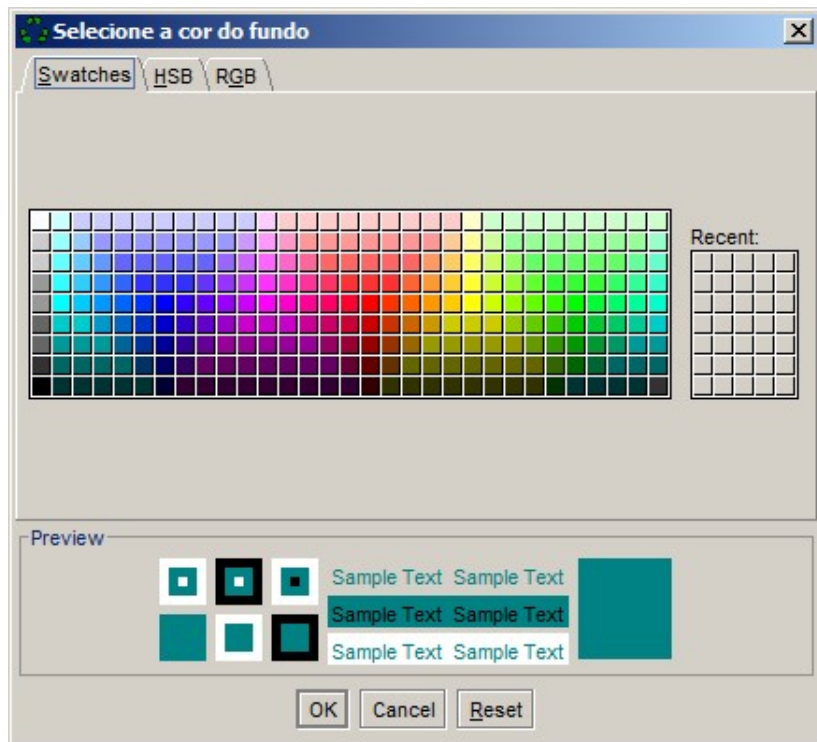


Figura 7.5: Mudando a cor de fundo do diagrama.

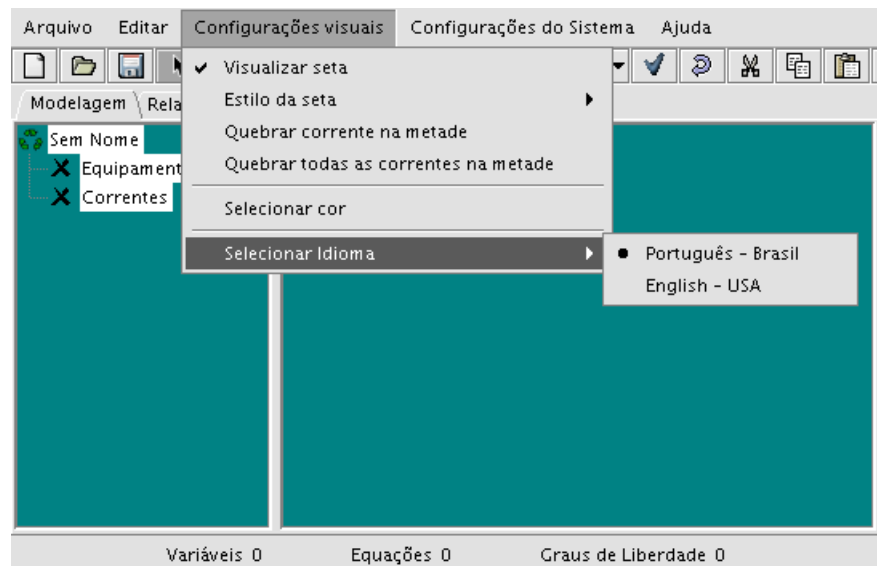


Figura 7.6: Mudando o idioma do RecoVR.

7.2 Motores de cálculo

Para acessar a configuração dos parâmetros dos motores de cálculo do RecoVR, basta clicar no menu Configurações do Sistema e, em seguida, Configurar parâmetros. Será apresentada uma janela de diálogo como a vista na [Figura 7.7](#).

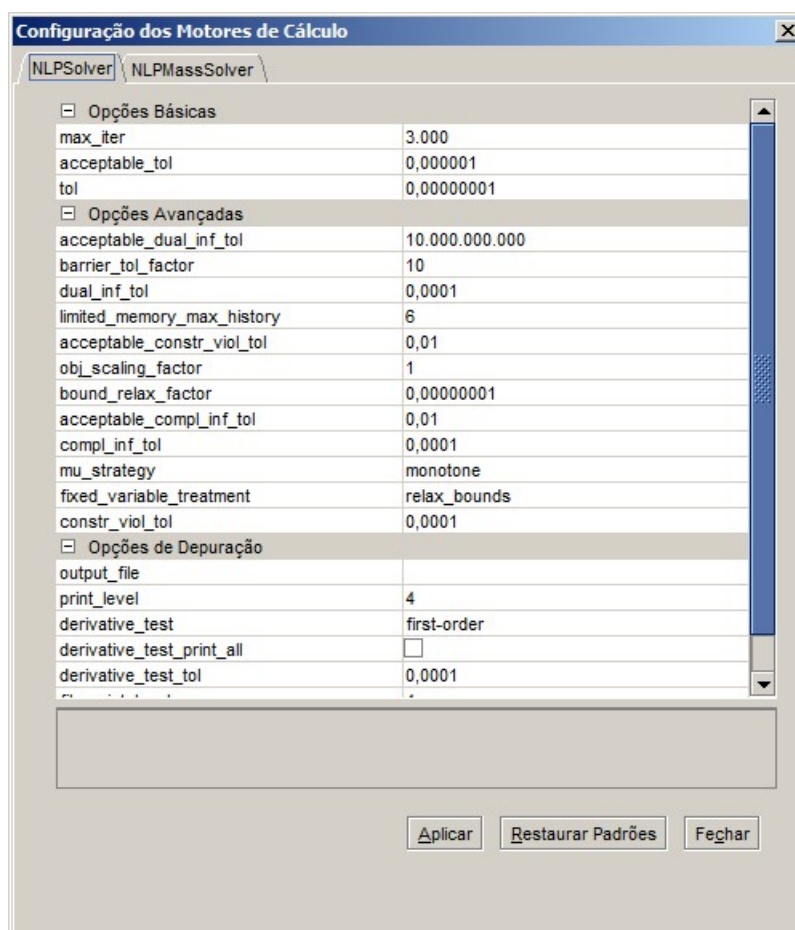


Figura 7.7: Diálogo de configuração dos motores de cálculo.

Estão disponíveis dois motores de cálculo no RecoVR: o primeiro é um motor de cálculo de otimização e o outro é um motor de cálculo de integração de processos. Este último faz um pré-tratamento no problema de integração antes que seja enviado para o motor de cálculo de otimização.

7.2.1 Motor de cálculo de otimização: NLPs Solver

O motor de cálculo de otimização é usado em praticamente todas as funcionalidades do RecoVR, à exceção apenas do cálculo de observabilidade e redundância. Devido à sua complexidade, é importante que o usuário já tenha noções de técnicas de otimização para compreender melhor este capítulo.

No caso específico da **simulação**, o problema de otimização é escrito da seguinte forma:

$$\begin{cases} \min_{x_n} Ct \\ \text{sujeito a} \\ g(x_n) \geq 0 \\ h(x_n) = 0 \end{cases} \quad (7.1)$$

Onde:

Ct : Função objetivo constante.

$g(x_n)$: Limites operacionais.

$h(x_n)$: Restrições de balanço de massa.

Ou seja o objetivo é somente satisfazer as restrições de balanço de massa e as restrições extras impostas pelo usuário.

No caso da **reconciliação de dados**, o problema de otimização pode ser escrito da seguinte forma:

$$\begin{cases} \min_{x_n} \sum_{i=1}^n w_i \cdot (y_i - x_i)^2 \\ 0 \leq x_n \leq x_{nmax} \\ \text{sujeito a} \\ h(x_n) = 0 \end{cases} \quad (7.2)$$

Onde:

$h(x_n)$: Restrições impostas pelo balanço de massa.

w_i : Pesos ou precisões dos medidores.

y_i : Vazões medidas.

x_i : Vazões ajustadas.

E, no caso da **integração de processos**, o problema é escrito da seguinte forma:

$$\begin{cases} \min_{x_n} \gamma_1 \sum_{i=1}^n w_i \cdot CF_i \cdot x_i + \\ \gamma_2 \sum_{i=1}^n w_i \cdot CVar_i \cdot x_i + \\ \gamma_3 Fr_i + \\ \gamma_4 Efl_i + \\ \text{sujeito a} \\ g(x_n) \geq 0 \\ h(x_n) = 0 \end{cases} \quad (7.3)$$

Onde:

γ_i : Pesos (importância) relativos para os termos da otimização.

w_i : Pesos (importância) para os custos.

CF_i : Custos das novas conexões (fixos).

$CVar_i$: Custos variáveis (bombeamento ou proporcional à vazão).

Fr_i : Vazão de água proveniente dos equipamentos do tipo *Fonte* (água fresca).

Efl_i : Vazão de água proveniente dos equipamentos do tipo *Su- midouro* (efluente).

x_i : Vazões.

$g(x_n)$: Limites operacionais.

$h(x_n)$: Restrições de balanço de massa.

Para a resolução destes casos, o RecoVR monta, internamente, cada um dos problemas de otimização e estes são resolvidos numericamente por um pacote externo, que contém as rotinas numéricas necessárias. O pacote escolhido para a resolução é o IPOPT ([1, Wächter 2002], [2, Wächter 2006]) desenvolvido pela entidade COIN-OR e patrocinado pela empresa IBM©. Esta pacote foi escolhido pelos seguintes motivos:

- Ser código aberto, licença CPL;
- Ser patrocinada por uma das maiores empresas de informática no mundo;
- Possui um bom suporte por parte de seus desenvolvedores;
- Possui elevada eficiência computacional.

No IPOPT ([1, Wächter 2002], [2, Wächter 2006]), estão disponíveis dezenas de parâmetros de configuração, sendo que os mais importantes são editáveis pelo usuário. Estes parâmetros são apresentados na Figura 7.8, que reproduz a janela de configuração do RecoVR. Uma listagem de todos os parâmetros disponíveis é encontrada na Tabela 7.1.

Na janela de configuração dos parâmetros do motor de cálculo, o usuário pode ver uma breve descrição de cada parâmetro disponível para edição. Para isto, basta selecionar o parâmetro e a descrição é mostrada no painel inferior da janela.

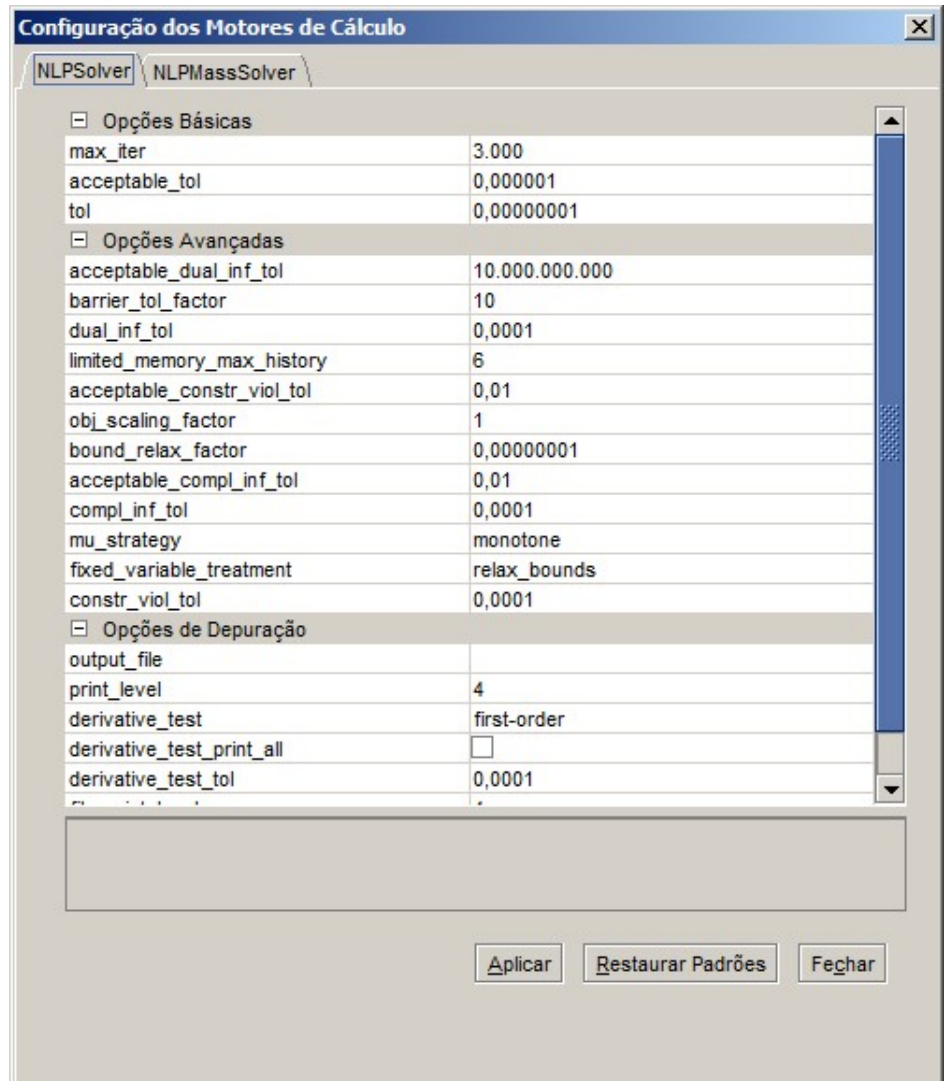


Figura 7.8: Configuração do IPOPT.

Tabela 7.1: Opções de configuração do IPOPT

Nome da opção	Descrição
tol	Tolerância de convergência desejada (relativa)
compl_inf_tol	Tolerância para as condições de complementariedade
dual_inf_tol	Tolerância para a inviabilidade no espaço dual
constr_viol_tol	Tolerância para a violação na restrição
acceptable_tol	Tolerância de convergência aceitável (relativa)
acceptable_compl_inf_tol	Tolerância aceitável (relativa) para as condições de complementariedade
acceptable_constr_viol_tol	Tolerância aceitável (relativa) para a violação das restrições
acceptable_dual_inf_tol	Tolerância aceitável (relativa) para a inviabilidade no espaço dual
barrier_tol_factor	Critério de parada da barreira
obj_scaling_factor	Fator de escala para a função objetivo
bound_relax_factor	Fator inicial para a relaxação das restrições
max_iter	Maximo número de iterações
limited_memory_max_history	Tamanho máximo de armazenamento da história da matriz Hessiana aproximada (Quasi-Newton)
file_print_level	Nível de informações no arquivo de saída
print_level	Nível de informações para as saídas de tela
mu_strategy	Estratégia de atualização do parâmetro de barreira
output_file	Nome do arquivo de saída
derivative_test_tol	Tolerância para indicar derivadas com problema
derivative_test	Ativar verificação de derivadas
derivative_test_print_all	Imprimir todos os valores estimados para as derivadas
print_user_options	Imprimir todas as opções fornecidas pelo usuário
linear_solver	Pacote de algebra linear a ser utilizado
fixed_variable_treatment	Determina o tratamento dado as variáveis fixas (limite inferior igual ao superior)
make_constraint	Torna a variável fixa, uma restrição
make_parameter	Torna a variável fixa, um parâmetro(constante) e remove do problema de otimização

7.2.2 Motor de cálculo de integração de processos: NLPMassSolver

Conforme mencionado anteriormente, o motor de cálculo de integração de processos faz um pré-tratamento no problema de otimização, antes de enviá-lo para a resolução pelo motor de cálculo de otimização, o IPOPT ([1, Wächter 2002], [2, Wächter 2006]). Tal tratamento reduz a complexidade do problema de otimização, conforme citado na [Seção 6.6](#). Para este motor de cálculo que executa o pré-tratamento do problema de otimização estão disponíveis opções apresentadas na [Tabela 7.2](#).

A aba de configuração da integração de processos, onde o usuário pode alterar estes parâmetros, é acessada pelo menu Configurações do sistema, no ítem Configurar parâmetros, na guia NLPMassSolver. A janela de diálogo é apresentada na [Figura 7.9](#).

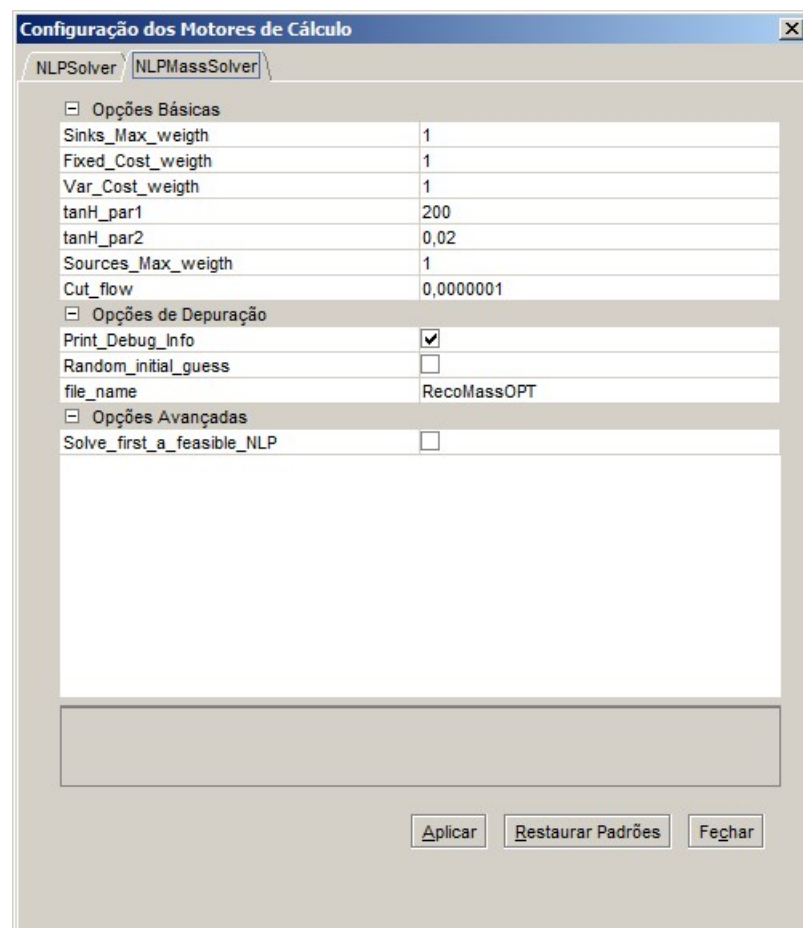


Figura 7.9: Configurando a integração mássica.

Tabela 7.2: Opções de configuração da integração mássica

Nome da opção	Descrição
Sources_Max_weigth	Peso dado ao termo de minimização do uso da água.
Sinks_Max_weigth	Peso dado ao termo de minimização do descarte de efluentes.
Fixed_Cost_weigth	Peso dado ao termo de minimização dos custos de novas conexões.
Var_Cost_weigth	Peso dado ao termo de minimização dos custos de bombeamento (proporcional a vazão)
Cut_flow	Fator de eliminação de novas correntes. NOVAS correntes com vazões menor que este fator serão descartadas.
tanH_par1	Parâmetro 1 da função Tangente hiperbólica. $(\tanh(\text{partanHPar1}*(x-\text{partanHPar2}))+1)/2$
tanH_par2	Parâmetro 2 da função Tangente hiperbólica. $(\tanh(\text{partanHPar1}*(x-\text{partanHPar2}))+1)/2$
Print_Debug_Info	Imprime informações de depuração
Random_initial_guess	Resolve o NLP com estimativas iniciais aleatórias
Solve_first_a_feasible_NLP	Encontra um resultado viável em termos de balanço de massa antes de resolver o NLP completo.
file_name	Nome do arquivo de depuração



Atenção: Os valores no argumento da tangente hiperbólica já foram previamente ajustados e otimizados. Sugere-se que os mesmos não sejam modificados.

Dentre os parâmetros de configuração do motor de cálculo, temos o `Cut_flow`, ou fator de corte, que descarta novas correntes com vazões menores que este valor.

Para facilitar a depuração e resolução do problema, está disponível a função `Random_Initial_Guess`, que conecta todas as correntes e gera chutes iniciais para as vazões ao invés de usar os valores padrões de vazões e composições. Tal opção pode ser utilizada para resolver um problema que não possui solução viável.

Outro parâmetro que também pode ajudar a resolução do problema é o `Solve_first_a_feasible_NLP`, que resolve um problema de otimização somente com os balanços, adicionando posteriormente a função objetivo.

Referências Bibliográficas

- [1] WÄCHTER A. An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Optimization with Applications in Process Engineering, Phd Thesis, Carnegie Mellon University, 2002.
- [2] WÄCHTER A, BIEGLER L T. On the Implementation of a Primal-Dual Interior Point Filter Line Search Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming, *Mathematical Programming*, 2006, 106, 25-57.
- [3] NARASHINHAM S., JORDACHE C. Data Reconciliation and Gross Error Detection - An Intelligent Use of Process Data. *Houston: Gulf Publishing Company*, 2000.
- [3] FONTANA, D. Recuperação de águas de processos, desenvolvimento de um problema padrão. . 2002. 110 p. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [4] FARENZENA, M. et al. XV COBEQ - Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Curitiba-PR. Anais do XV COBEQ - Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Curitiba: 2004. p. CD-ROM.
- [5] RAGHAVA RAO, J.et al. Recouping the wastewater: a way forward for cleaner leather processing. *Journal of Cleaner Production*, 11, i. 5, 591-599, Aug. 2003.
- [6] MANN, J.G.; LIU, Y.A. Industrial water reuse and wastewater minimization. 1999.
- [7] EL-HALWAGI, M.M. Pollution Prevention through Process Integration - Systematic Design Tools. 1 a. ed. Londres: Academic Press, 1997.
- [8] EL-HALWAGI, M.M.; MANOUSIOUTHAKIS, V. Synthesis of Mass Exchange Networks. *AIChE Journal*, 35, i. 8, 1233-1244, 1989.
- [9] WANG, Y.P.; SMITH, R. Wastewater minimisation. *Chemical Engineering Science*, 49, i. 7, 981-1006, Apr. 1994.
- [10] GOMES, J.F.S. Procedimento para minimização de Efluentes Aquosos. 2002. Curso de Pós-Graduação em Tecnologia

de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

- [11] VALLE, E.C. do. Minimização do Uso de Água e Efluentes com Considerações Econômicas e Operacionais via Programação Matemática, Diss. de Mestrado, UFRGS Porto Alegre, 2005.
- [12] VALLE, E.C. do, Vantagens e Oportunidades da Aplicação de Conceitos de Tecnologias Limpas na Indústria, Ciência em Movimento, Ano VIII, No 15 , 2006. Porto Alegre.

Índice Remissivo

- Ajuste, 49
- Atualizações do RecoVR, vi
- Balanço de massa
 - de divisão individual, 28
 - de divisão para todos componentes, 28
 - entre pares de portas, 27
 - para todos componentes, 27
- Chave eletrônica, 3
- Configurações
 - Visuais, 75
 - Componentes, 7
 - Correntes, 20
 - Integração Mássica, 72
 - IPOPT, 81
 - Motores de Cálculo, 78
 - Motores de Cálculo de Integração de Processos, 83
 - Motores de Cálculo de Otimização , 79
 - NLPMassSolver, 81, 83
 - Portas, 18
 - Unidades, 16
- Correntes
 - Configurando, 20
 - cores, 33
 - estilo da seta, 75
 - Limites para novas conexões, 61
 - observabilidade, 31
- Custos fixos, 60
- Custos variáveis, 60
- Diagrama
 - Área, 8
 - Cor de fundo, 77
- Direitos autorais, iv
- Equipamentos
 - Biblioteca, 13
 - Conectando, 20
 - cores das bordas, 15
 - detalhes, 14
 - Limites de conc. na entrada, 63
 - Limites de conc. na saída, 63
 - Limites de vazões de entrada, 63
 - Limites de vazões de saída, 63
 - Modelando, 22
 - Modelos internos, 25
 - Processo Genérico, 25
 - Propriedades, 15
 - Regenerador, 25
- Graus de liberdade, 38
- Graus de Redundância, 43
- Instalação, 3
 - chave eletrônica, 3
 - Problemas, 4
 - Windows, 4
- Integração Mássica
 - Custos fixos, 60
 - Custos variáveis, 60
 - Formulação matemática, 79
 - Limites para conc. de entrada, 63
 - Limites para conc. de saída, 63
 - Limites para novas conexões, 61
 - Limites para vazões de entrada, 63
 - Limites para vazões de saída, 63
 - Status do diagrama, 59
- Limites Operacionais, 55
- Medidores
 - Alocação, 44
 - Erros, 46
- Modelos Matemáticos
 - Abstração dos equipamentos, 23
 - balanço de divisão, 28
 - balanço de divisão individual, 28
 - balanço entre pares de porta, 27
 - balanço para todos componentes, 27
 - custos, 27
 - nos equipamentos, 25
 - reação, 29

- transferência de massa, 29
- Motores de Cálculo
 - IPOPT, 80
 - Opções, 78
- Observabilidade e Redundância
 - Definição de observabilidade, 31
 - Definição de redundância, 43
- Projeto de Redes de Reúso
 - Configurações Avançadas, 70
 - Definições Matemáticas, 57
 - Dicas, 68
 - Executando, 58
 - Implementação sistemática, 55
 - Resultados, 66
- Reúso
 - Configurações Avançadas, 70
 - Definição Matemática, 57
 - Dicas, 68
 - Executando, 58
 - Implementação sistemática, 55
 - Potenciais de ganho, 54
 - Resultados, 66
- Reconciliação de dados, 46
 - Definição Matemática, 46
 - Executando, 47
 - Exemplo, 47
 - Formulação matemática, 79
- RecoVR
 - direitos autorais, iv
 - Idioma, 77
 - instalação, 3
 - Interface, 7
 - Introdução, 2
 - Tecnologia, 3
- Redundância
 - Definição, 43
- Símbolos e Convenções, v
- Simulação
 - Configurando corretamente, 38
 - Definições, 37
 - Executando, 40
 - Formulação matemática, 79
 - Importância, 36
- Status do diagrama, 59
- Suporte, vi
- Taxa de reação mássica, 29
- Tecnologia, 3
- Transferência de massa por componente, 29
- VRTech
 - suporte, vi