

# Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL



## Relatório Técnico

<b>Nº/Ano:</b> 6691/2019	<b>Nº de Páginas:</b> 11	<b>Nº de Anexos:</b> 0
--------------------------	--------------------------	------------------------

<b>Título:</b> Consideração De Restrições De Segurança Da Rede Elétrica No Modelo Dessem
--

<b>Departamento:</b> Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA
--

<b>Área de Responsabilidade:</b> B200	<b>Conta de Apropriação:</b> 1600
---------------------------------------	-----------------------------------

<b>Cliente:</b> OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS Rua Júlio do Carmo, 251 - Cidade Nova Rio de Janeiro - RJ, CEP: 20211-160 <b>Atenção:</b> Alberto Sérgio Kligerman
---

<b>Resumo:</b> Este relatório especifica a representação das Restrições Elétricas de Segurança no modelo DESSEM.
---

<b>Autores:</b> Tiago Norbiato dos Santos - Cepel André Luiz Diniz Souto Lima - Cepel Renato Neves Cabral - Cepel Luis Fernando Elyas Cerqueira da Silva - Cepel
--

<b>Palavras-Chave:</b> Rede Elétrica, Restrições de Segurança, Representação por Função Linear por Parte, Rampa de Variação de Fluxo, Equação de Fluxo, Banda Morta <b>Classificação:</b> CONTROLADO
--

<b>Gerente de Projeto</b>  Tiago Norbiato dos Santos <b>Tel.:</b> 2598-6245 <b>E-mail:</b> tnorbiato@cepel.br
---

<b>Chefe do Departamento DEA</b>  André Luiz Diniz Souto Lima <b>Tel.:</b> 2598-6046 <b>E-mail:</b> diniz@cepel.br
--

<b>Aprovação</b>  Raul Balbi Söllero Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação 30 / 10 / 19
---

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL [www.cepel.br](http://www.cepel.br)  
Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000 - Fax: 21 2260-1340  
Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200 - Fax: 21 2667-3518  
Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21944-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: [cepel@cepel.br](mailto:cepel@cepel.br)

**CEPEL**

**Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**

**Projeto DESSEM**

**CONSIDERAÇÃO DE RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA DA REDE ELÉTRICA**

**NO MODELO DESSEM**

**10 / 2019**

### ÍNDICE:

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b><u>001</u></b>
1.1 Definições: .....	<u>001</u>
<b>2. EQUAÇÕES – MODELO MATEMATICO .....</b>	<b><u>223</u></b>
2.1 Equação de Fluxo: Bloco "DREF" .....	<u>223</u>
2.2 Limites para as equações de fluxo: .....	<u>223</u>
2.3 Limite padrão: Registro NRESP .....	<u>334</u>
2.4 Limites de Segurança .....	<u>334</u>
2.5 Reserva de potência:.....	<u>334</u>
2.6 Rampas de fluxo.....	<u>335</u>
<b>3. PROCESSO ITERATIVO PARA A VERIFICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA .....</b>	<b><u>556</u></b>
<b>4. MÉTODO DE LINEARIZAÇÃO POR PARTES DAS RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA.....</b>	<b><u>667</u></b>
<b>5. ENTRADA DE DADOS .....</b>	<b><u>778</u></b>
5.1 Introdução.....	<u>778</u>
5.2 Equação de Fluxo e Limite padrão .....	<u>778</u>
5.3 Limites de Segurança por Tabelas - TABELAS .....	<u>778</u>
5.4 Limites definidos por Funções Lineares por Partes – LPP.....	<u>889</u>
5.5 Reserva de potência.....	<u>889</u>
5.6 Rampas.....	<u>889</u>

### 1. INTRODUÇÃO

Durante o processo de validação do modelo DESSEM, como ferramenta de apoio a operação ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), verificou-se que havia um descolamento entre a proposta de despacho e a operação empregada atualmente. Estas diferenças ocorriam devido a não consideração de restrições operativas para a segurança da rede elétrica.

Estas restrições fazem parte de estudos constantes desenvolvidos pelo ONS e atualizados quadrimestralmente, limitando determinados fluxos, sejam em uma única linha ou em um conjunto de linhas de transmissão, em função de parâmetros que podem ser fixos e pré-determinados na entrada de dados ou serem resultados da operação.

Este relatório técnico especifica as restrições empregadas às equações de fluxo da rede elétrica que representam tais medidas de segurança.

#### 1.1 Definições:

Para tratar as Restrições de Segurança da Rede Elétrica (RESTSEG) foram utilizadas as Equações de Fluxo (DREF), funcionalidade para a rede elétrica que trata de restrições de limite de fluxo e de somatório de fluxos. Seguem termos e definições a serem utilizados neste relatório técnico:

**Bloco DREF (ou DREF MUDA):** Bloco (conjunto de registro) de dados da rede elétrica com a definição de equações de fluxo. Maiores detalhes no manual do usuário versão 18.1 seção III.12.4.8;

**Registros NRESP:** Registros da entrada de dados da rede elétrica com limites para as equações de fluxo. Maiores detalhes no manual do usuário versão 18.1 seção III.12.4.8;

**Equações de fluxo:** São as equações definidas nos arquivos da rede elétrica no bloco DREF, sendo compostas por um somatório de fluxos em linhas de transmissão e injeções de potência líquida em barras da rede elétrica;

**Limites padrão:** São os limites para as equações de fluxo definidos nos registros NRESP;

**Limites de Segurança:** São os valores que substituem o limite padrão e dependem de algum parâmetro definido na entrada de dados ou dos resultados para a operação;

**Reserva de Potência Elétrica:** Valor a ser reduzido no limite superior da equação de fluxo, sejam os limites padrão ou de segurança, para que haja uma reserva de transmissão conhecida como “Banda Morta”;

**Rampas:** Também definida com taxa de variação, é a máxima variação que pode ocorrer entre períodos para o resultado da equação de fluxo. Portanto, define a máxima oscilação entre períodos das equações de fluxo

## 2. EQUAÇÕES – MODELO MATEMÁTICO

### 2.1 Equação de Fluxo: Bloco "DREF"

A equação ou somatório de fluxos, definida em (2.1), é o fluxo de uma linha ou a soma de fluxos de um conjunto de linhas. Nestas equações também podem ser incluídas a potência líquida injetada em uma barra da rede elétrica. Cada componente pode ter um fator de participação diferenciado.

$$SmFlx_i^t = \sum_{j=1}^{nl_i} fl_{i,j} Flx_j^t + \sum_{j=1}^{nb_i} fb_{i,j} G_j^t \quad (2.1)$$

Onde:

$SmFlx_i^t$ : Equação de fluxo  $i$  no período  $t$ ;

$fl_{i,j}$ : Fator de participação do fluxo na linha  $j$  da equação de fluxo  $i$ ;

$Flx_j^t$ : Fluxo na linha  $j$  no período  $t$ ;

$fb_{i,j}$ : Fator de participação da injeção de potência líquida na barra  $j$  da equação de fluxo  $i$ ;

$G_j^t$ : Injeção de potência líquida na barra  $j$  período  $t$ ;

$nl_i$ : Número de linhas que compõem a equação de fluxo  $i$ ;

$nb_i$ : Número de barras que compõem a equação de fluxo  $i$ .

### 2.2 Limites para as equações de fluxo:

As equações ( $SmFlx_i^t$ ) de fluxo apresentadas em (2.1) são limitadas por um limite inferior e superior como apresentado a seguir:

$$\underline{SmFlx_i^t} \leq SmFlx_i^t \leq \overline{SmFlx_i^t} \quad (2.2)$$

**Relatório Técnico – 6691 / 2019**

O limite inferior  $\underline{SmFlx}_i^t$  é sempre fixo e definido nos registros NRESP na entrada de dados, enquanto o limite superior  $\overline{SmFlx}_i^t$  pode ser fixo ou definido a partir da operação dos elementos do sistema como descrito a seguir:

**2.3 Limite padrão: Registro NRESP**

Valores fixos lidos nos arquivos de entrada (registros NRESP) e que não são alterados ao longo do processo iterativo para a inclusão da rede e da resolução do problema como todo.

**2.4 Limites de Segurança**

É calculado com base em tabelas e parâmetros fornecidos nos dados de entrada ou obtidos na operação do modelo DESSEM. Estes valores sobrescrevem os valores lidos nos arquivos de entrada – Registro NRESP, e podem ser representados por dois métodos:

**TABELAS:** Os limites das equações de fluxo são atualizados iterativamente dentro do processo iterativo para inserir as restrições da rede elétrica no problema de otimização (vide seção 3);

**Funções Lineares por Parte (LPP):** Os limites das equações de fluxo são variáveis do problema de otimização e definidos por funções lineares por parte (vide seção 4).

**2.5 Reserva de potência:**

A reserva de potência é uma medida de segurança adicional, na qual o limite superior definido para uma equação de fluxo é reduzido para garantir que, em uma emergência, seja possível aumentar o fluxo, ou somatório de fluxo, entre duas regiões. Na equação (2.3) é apresentada a aplicação da reserva de potência:

$$\underline{SmFlx}_i^t \leq SmFlx_i^t \leq \overline{SmFlx}_i^t - RPE_i^t \quad (2.3)$$

onde  $RPE_i^t$  é a reserva de potência a ser reduzida do limite superior de uma equação de fluxo;

**2.6 Rampas de fluxo**

**Relatório Técnico – 6691 / 2019**

“Rampa de fluxo” é taxa de variação entre dois períodos para uma dada equação de fluxo, como definida em (2.4).

$$-\underline{RmpFlx}_i^t \leq SmFlx_i^t - SmFlx_i^{t-1} \leq \overline{RmpFlx}_i^t \quad (2.4)$$

Onde:

$RmpFlx_i^t$  : Valor máximo de redução em uma equação de fluxo;

$RmpFlx_i^t$  : Valor máximo de subida em uma equação de fluxo.

### 3. PROCESSO ITERATIVO PARA A VERIFICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA

Neste método, para representar os limites de segurança, ao final de cada iteração para incluir restrições de rede, consulta-se uma tabela com os limites de segurança segundo a operação obtida na operação do problema. Com estes limites, verificam-se as equações de fluxos e, caso não estejam dentro dos limites, as restrições correspondentes são incluídas no problema de otimização. A seguir é apresentado o algoritmo para a inclusão e tratamento das restrições de segurança representadas por tabelas (TABELAS):

1. Resolve-se o problema de otimização (Problema de programação linear (PL) ou Problema Misto Inteiro Linear (MILP) com as restrições atuais;
2. Calculam-se as equações de fluxo com base nas gerações das usinas hidroelétricas e térmicas;
3. Com base na operação das usinas e demais elementos dos sistemas, e de parâmetros fixos, consulta a tabela com os limites de segurança e obtêm-se os limites das equações de fluxo;
4. Verifica se algum fluxo/equação de fluxo foi violado, ou seja, se os valores obtidos no passo 2 são inferiores aos obtidos no passo 3;
5. Se ocorreu violação, os limites obtidos no passo 3 são inferiores aos valores obtidos no passo 2; insere-se a equação de fluxo no problema de otimização PL/MILP como uma restrição e volte ao passo 1; senão pare.

A Figura 3.1 ilustra o processo iterativo para a inclusão das restrições de segurança.

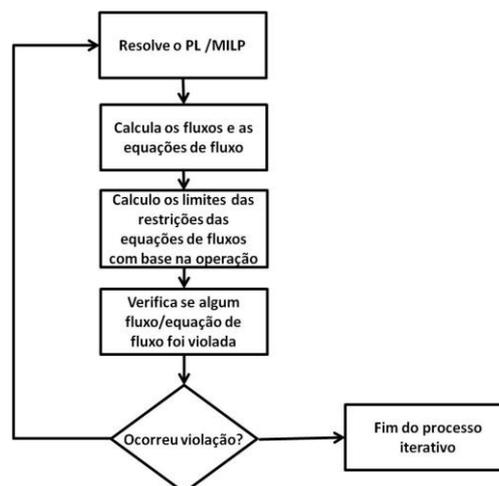


Figura 3.1 Fluxograma com o processo iterativo para a consideração das restrições de segurança.

**4. MÉTODO DE LINEARIZAÇÃO POR PARTES DAS RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA**

Neste método para o tratamento das restrições de segurança, o usuário define um conjunto de equações tendo como parâmetros equações de fluxos definidos no bloco DREF.

Os limites das restrições de equação de fluxo são definidos por uma função linear por partes:

$$SmFlx_i^t \leq \overline{SmFlx_i^t}, \quad (4.1)$$

onde os limites  $\overline{SmFlx_i^t}$  são definidos por uma função linear por partes informado pelo usuário, com o seguinte formato:

$$\overline{SmFlx_i^t} \leq \alpha_i P + \beta_i \quad (4.2)$$

Onde:

$P$ : é um parâmetro definido pelo usuário, pode ser uma equação de fluxo, a carga de um submercado, a carga do SIN, a geração/carga de uma barra, ... .

$i$ : o índice do corte da função linear por partes,  $i=1, n$

$n$ : número de cortes da função linear por partes;

$\alpha_i$ : coeficiente angular da equação;

$\beta_i$ : coeficiente linear da equação;

### 5. ENTRADA DE DADOS

#### 5.1 Introdução

Os arquivos e referências mencionados nesta seção são baseados na versão 18.1 do manual do usuário do modelo DESSEM. Para cada restrição é necessário informar o nome do arquivo que contém os dados das restrições e limites. Na seção III.1.3 são listados os mnemônicos para a definição de cada arquivo.

#### 5.2 Equação de Fluxo e Limite padrão

As equações de fluxo são definidas nos dados da rede elétrica, sejam nos arquivos de caso base ou nos arquivos de modificação. São necessários os blocos DREF com os elementos participantes da equação e seus fatores, seção III.12.4.48, e os registros NRESP com os limites padrões, seção III.12.4.9

#### 5.3 Limites de Segurança por Tabelas - TABELAS

Cada limite de segurança por TABELA é composto pelos seguintes blocos/registros:

**Seção III.19.1 Registros "TABSEG INDICE":** Definição da restrição de segurança por TABELA.

**Seção III.19.2 Registros "TABSEG TABELA":** Informa a equação para a qual o limite de segurança será definido – DREF controlada, e os parâmetros controladores que podem ser: uma DREF controladora, uma a carga de um submercado, ou a carga completa do sistema.

**Seção III.19.2.1 Registros "TABSEG LIMITE":** Cria os intervalos para os parâmetros em que os limites variam.

**Seção III.19.2.2 Registros "TABSEG CELULA":** Limite para cada intervalo de cada parâmetro.

### 5.4 Limites definidos por Funções Lineares por Partes – LPP

São necessárias as seguintes informações para as LPP:

**Seção III.22.1.1 Registros de definição:** Registro com a definição de uma LPP, da DREF controlada, para a qual os limites serão dados pelas LPP, e a DREF controladora a qual será o parâmetro variável da LPP.

**Seção III.22.1.2 Registros de adição de mais de uma restrição controlada:** Registros para adicionar parâmetros controladores da LPP.

**Seção III.22.1.3 Registros de definição dos parâmetros:** Registros com parâmetros fixos para a escolha de qual LPP deverá ser utilizada.

**Seção III.22.1.4 Registros de definição dos valores dos parâmetros para a escolha da LPP:** Definição dos intervalos dos parâmetros.

**Seção III.22.1.5 Registros de definição das LPP para cada valor de parâmetro definido nos registros 0:** Definição dos coeficientes lineares e angulares das LPP.

### 5.5 Reserva de potência

Para a reserva de potência são necessárias as seguintes informações:

**Seção III.21 Arquivo com as reservas de potência para as inequações de fluxo:** Para a reserva de potência elétrica é necessário apenas os registros REPE, no qual são definidas as DREF com reserva e os valores adotados.

### 5.6 Rampas

Para as rampas são necessárias as seguintes informações:

**Seção III.20.1.1 Registros de definição:** Nestes registros são definidos as DREF com restrição de rampa de fluxo.

**Seção III.20.1.2 Registros com os limites:** São informados os valores de rampa para as DREF.

