

# Elemento *Storage* do OpenDSS

## 1 Objetivo

O objetivo desse documento é descrever a modelagem e os diferentes modos de operação do elemento *storage* do OpenDSS. Primeiramente, o modelo do elemento é apresentado e, em seguida, os principais parâmetros utilizados no OpenDSS para representar esse componente são listados. Os seus modos de despacho também são discutidos e, por fim, exemplos de códigos na linguagem de programação do OpenDSS são apresentados.

## 2 Por quê?

Nos últimos anos, com o crescimento da penetração de renováveis nos sistemas elétricos como as de origem solar e eólica, muito tem-se discutido a respeito dos problemas causados pela intermitência dessas fontes e os impactos que a mesma causa na operação e estabilidade dos sistemas de potência. Sistemas de armazenamento de energia tem sido propostos para solucionar grande parte desses problemas, não só à nível de redes de transmissão, mas também de distribuição. Esses sistemas também tem grande importância na operação de minirredes isoladas e, em particular, na operação de sistemas de distribuição, podendo reduzir a demanda de pico e postergar investimentos em ativos. Já do lado do consumidor, pode ser de grande auxílio na redução dos custos com eletricidade no mercado livre de energia elétrica. Do ponto de vista de simulação, a utilização de modelos de armazenamento de energia acrescenta, naturalmente, a dimensão temporal no processo, dado que energia é potência integrada no tempo. Nesse sentido, para uma avaliação mais fiel da operação de sistemas com armazenamento de energia ao longo de um período considerável de tempo, simulações temporais (*QSTS*, *Quasi-static Time Series*) devem ser utilizadas, em detrimento de simulações estáticas, sendo as primeiras, uma capacidade fundamental do OpenDSS.

## 3 Modelagem

No OpenDSS, o elemento *storage* corresponde a um elemento PC (elemento de conversão de energia). Em linhas gerais, ele é modelado como uma carga de potência constante, durante a carga, e como um gerador que pode injetar potência na rede, durante a descarga, desde que de acordo com as suas especificações, tais como o seu limite de taxa de carga e descarga e o seu estado carga. Assim como o elemento *PVSystem*, o elemento *storage* pode operar tanto no modo isolado quanto em conjunto com um elemento de controle, *StorageController*, responsável por comandar a sua operação. Essa nota técnica trata somente da operação isolada do elemento armazenador. O modelo desse elemento é apresentado na figura 1.

Cada um dos componentes da figura 1 é explicado abaixo:

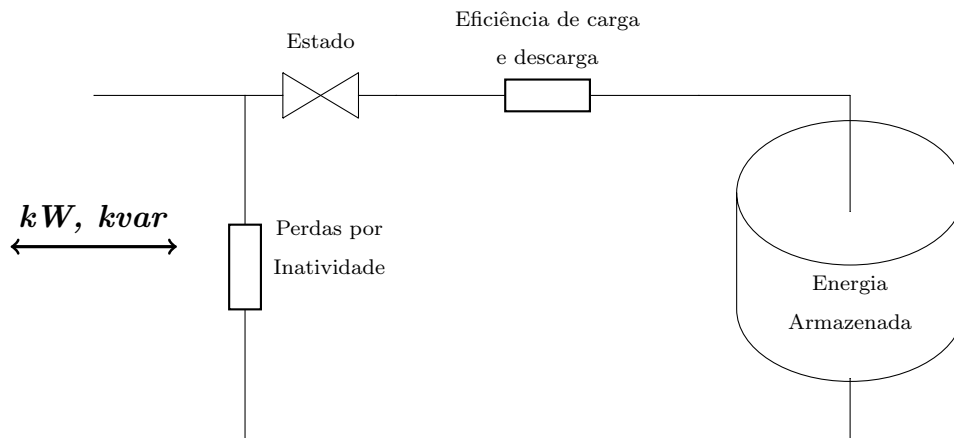


Figura 1: Diagrama do modelo do elemento *Storage* do OpenDSS

- Armazenador de Energia Ideal: a sua energia varia de acordo com a evolução do estado do elemento *storage* entre carga, descarga e isolado, a potência despachada e as suas perdas.
- Perdas por carga e descarga: representa as perdas por carga e descarga do armazenador. No OpenDSS, essas duas perdas são independentes e são especificadas em termo de eficiência de carga e descarga.
- Estado: representa de modo abstrato o estado em que o elemento opera, o qual pode ser apenas um entre Carga (*Charge*), Descarga (*Discharge*) e Isolado (*Idling*).
- Perdas por “Inatividade”: representa as perdas em sistemas de armazenamento quando eles não se encontram nem no estado de carga, nem no estado de descarga. Por exemplo, as perdas com o consumo de energia dos elementos de controle e refrigeração internos em baterias e fricção e resistência do ar em armazenadores com base em massa girante. Essas perdas são modeladas como uma impedância constante e são definidas como uma porcentagem da potência nominal do elemento *storage*.

O cálculo da potência no armazenador de energia ideal é feito de “trás para frente”, isto é, primeiramente determina-se a potência nos terminais do elemento armazenador de energia,  $kW$  e  $kvar$ , e em seguida, descontam-se as perdas por inatividade e as perdas por carga e descarga. Esse processo é apresentado na seção 5.

**Observação 1:** Assim como outros elementos de conversão de energia do OpenDSS, quando os níveis de tensão se encontram abaixo de  $V_{minpu}$  ou acima de  $V_{maxpu}$ , o modelo do elemento *storage* é convertido para impedância constante. Mais informações sobre a mudança de modelo com a tensão podem ser obtidas em [1].

**Observação 2:** Também é possível modelar o elemento *storage* diretamente como uma impedância constante através do parâmetro “*model*”.

## 4 Principais Parâmetros

A tabela 1 descreve os principais parâmetros desse elemento.

Tabela 1: Parâmetros do elemento Storage

Parâmetro	Descrição
<i>phases</i>	Número de Fases. A potência total é dividida uniformemente entre as fases.
<i>bus1</i>	Barra à qual o armazenador está conectado.
<i>kv</i>	Tensão Nominal em kV. Se bifásico ou trifásico, especificar tensão de linha. Se monofásico, especificar a tensão nominal sobre o elemento.
<i>kW</i>	Obtém ou atribui ( <i>Get/Set</i> ) a potência ativa em determinado instante, em kW.
<i>pf</i>	Fator de potência nominal nos estados de carga e descarga. <i>Default</i> = 1. Atribuir um valor à esse parâmetro automaticamente modifica o valor do parâmetro <i>kvar</i> .
<i>conn</i>	Conexão do elemento. Um entre wye, LN, delta ou LL. <i>Default</i> = wye.
<i>kvar</i>	Obtém ou atribui ( <i>Get/Set</i> ) a potência reativa em determinado instante, em kvar. Modo alternativo de especificar o fator de potência. Automaticamente ajusta o fator de potência para concordar com o valor atual de kW.
<i>kWrated</i>	Potência ativa nominal do elemento. É utilizado como base para as curvas de carga no modo de despacho “ <i>Follow</i> ”.
<i>kWhrated</i>	Capacidade nominal do armazenador, kWh. <i>Default</i> = 50.
<i>kWhstored</i>	Valor atual de energia armazenada, kWh. <i>Default</i> = igual a <i>kWhrated</i> .
<i>%stored</i>	Quantidade percentual de energia armazenada, com relação ao parâmetro <i>kWhrated</i> . <i>Default</i> = 100.
<i>%reserve</i>	Quantidade percentual da capacidade nominal de energia do armazenador que deve ser mantida durante a operação normal do elemento. <i>Default</i> = 20.
<i>state</i>	Obtém ou atribui ( <i>Get/Set</i> ) o estado atual do armazenador. Um entre { <i>idling</i>   <i>charging</i>   <i>discharging</i> } .
<i>%Discharge</i>	Taxa de descarga do armazenador, em porcentagem da potência nominal, <i>kWrated</i> . <i>Default</i> = 100.
<i>%Charge</i>	Taxa de carga do armazenador, em porcentagem da potência nominal, <i>kWrated</i> . <i>Default</i> = 100.
<i>%EffCharge</i>	Eficiência de carga do armazenador. <i>Default</i> = 90.
<i>%EffDischarge</i>	Eficiência de descarga do armazenador. <i>Default</i> = 90.
<i>%IdlingkW</i>	Porcentagem da potência nominal consumida enquanto no estado de inatividade ( <i>idling</i> ). <i>Default</i> = 1.
<i>%Idlingkvar</i>	Porcentagem da potência nominal consumida como potência reativa (kvar) enquanto no estado ilhado ( <i>idling</i> ). <i>Default</i> = 0.
<i>model</i>	Número inteiro que representa o modelo a ser utilizado para variar a potência do elemento com a tensão. <i>Default</i> = 1. Um entre: 1: potência constante com fator de potência fixo; 2: impedância constante; 3: modelo escrito pelo usuário;
<i>daily</i>	Curva de despacho para simulações no modo <i>daily</i> .

*Continua na próxima página*

Tabela 1 – Sequência da página anterior

Parâmetro	Descrição
<i>DispMode</i>	Modo de despacho. Um entre $\{default follow external loadlevel price\}$ . <i>Default</i> = default.
<i>DischargeTrigger</i>	Gatilho de despacho para descarregar o armazenador. Se nulo, o estado do armazenador é alterado pelo parâmetro <i>state</i> ou por um objeto <i>StorageController</i> . Se não nulo, o estado do armazenador é alterado para Descarga quando o valor do gatilho é excedido ou pelo <i>loadshape</i> ou o sinal de preço ou o <i>loadlevel</i> global, dependendo do modo de despacho definido através do parâmetro <i>state</i> .
<i>ChargeTrigger</i>	Gatilho de despacho para carregar o armazenador. Se nulo, o estado do armazenador é alterado pelo comando <i>state</i> ou por um objeto <i>StorageController</i> . Se não nulo, o estado do armazenador é alterado para Carga quando o valor do gatilho é maior que o valor especificado no <i>loadshape</i> ou o sinal de preço ou o <i>loadlevel</i> global, dependendo do modo de despacho definido através do parâmetro <i>state</i> .
<i>TimeChargeTrig</i>	Hora do dia em valores fracionados (por exemplo, 02:30hr deve ser especificada como 2.5) na qual o elemento armazenador irá automaticamente mudar seu estado para carga. <i>Default</i> = 2. Definir um valor negativo para desativar essa propriedade.
<i>debugtrace</i>	$\{yes no\}$ . <i>Default</i> = no. Ative esse parâmetro para salvar o progresso do modelo do armazenador em cada iteração. Cria um arquivo *.csv para o elemento armazenador com o nome "Nome_do_Armazenador.csv".

## 5 Operação

Esta seção visa demonstrar como ocorre o fluxo de energia e perdas no elemento *storage* durante a operação em cada um dos três estados possíveis. Um ponto importante a notar é que essa evolução ocorre independentemente do modo de despacho escolhido. Em outras palavras, seja qual for o modo de despacho selecionado, dado que a potência a ser despachada já foi calculada em um dado instante de tempo  $t$  da simulação, o fluxo de energia no armazenador ocorre de acordo com as expressões apresentadas nessa seção e se mantém constante até o próximo passo de tempo,  $t + \Delta t$ . Isso vale inclusive para os estudos em que o elemento armazenador é controlado por algum algoritmo externo, responsável por definir os instantes e a potência de carga e/ou descarga. Nessa seção, a seguinte nomenclatura será adotada:

- $P_{in}[t]$ : potência injetada no armazenador em um dado instante  $t$ , quando o mesmo se encontra no estado de carga;
- $P_{out}[t]$ : potência injetada na rede em um dado instante  $t$ , quando o armazenador se encontra no estado de descarga;
- $P_{idling}[t]$ : perdas por inatividade em um dado instante  $t$ ;
- $\eta_{ch}$ : eficiência durante a carga;
- $\eta_{dch}$ : eficiência durante a descarga;

- $E[t]$ : energia armazenada no instante  $t$ ;
- $\Delta t$ : passo de tempo da simulação.

## 5.1 Estado de Carga

O elemento só pode entrar nesse estado se a quantidade de energia armazenada ( $kWhStored$  ou  $%Stored$ ) é menor que a quantidade de energia nominal ( $kWhRated$ ). A taxa de carga é definida pelo usuário através do parâmetro  $%Charge$  ou do parâmetro  $kW$ . O fluxo de energia no armazenador durante o estado de **carga** é apresentado na figura 2. Uma vez determinados a potência injetada e as perdas por inatividade (seção 5.3) em um dado instante de simulação  $t$ , as perdas por carga são dadas por:

$$Perdas_{carga}[t] = (P_{in}[t] - P_{idling}[t]) \times (1 - \eta_{ch}) \quad [W] \quad (1)$$

Adicionando as perdas por inatividade em 1, obtem-se as perdas totais:

$$Perdas_{totais}[t] = P_{in}[t] \times (1 - \eta_{ch}) + P_{idling}[t] \times \eta_{ch} \quad [W] \quad (2)$$

A potência que, de fato, carrega o armazenador de energia ideal é dada por:

$$P_{inEfetiva}[t] = (P_{in}[t] - P_{idling}[t]) \times \eta_{ch} \quad [W] \quad (3)$$

Portanto, a energia armazenada um passo de tempo após o instante  $t$ , isto é,  $t + \Delta t$ , é dada por:

$$\begin{aligned} E[t + \Delta t] &= E[t] + P_{inEfetiva}[t] \times \Delta t \\ E[t + \Delta t] &= E[t] + (P_{in}[t] - P_{idling}[t]) \times \eta_{ch} \times \Delta t \quad [kWh] \end{aligned} \quad (4)$$

## 5.2 Estado de Descarga

O elemento só pode entrar nesse estado se a quantidade de energia armazenada é maior que a capacidade máxima de descarga ( $%Reserve$ ). A taxa de descarga pode ser definida pelo usuário através do parâmetro  $%Discharge$  ou através do parâmetro  $kW$ . O fluxo de energia no armazenador durante o estado de **descarga** é apresentado na figura 3. Uma vez determinados a potência injetada e as perdas por inatividade em um dado instante de simulação  $t$ , as perdas por descarga são dadas por:

$$Perdas_{descarga}[t] = (P_{out}[t] + P_{idling}[t]) \times \left( \frac{1}{\eta_{dch}} - 1 \right) \quad [W] \quad (5)$$

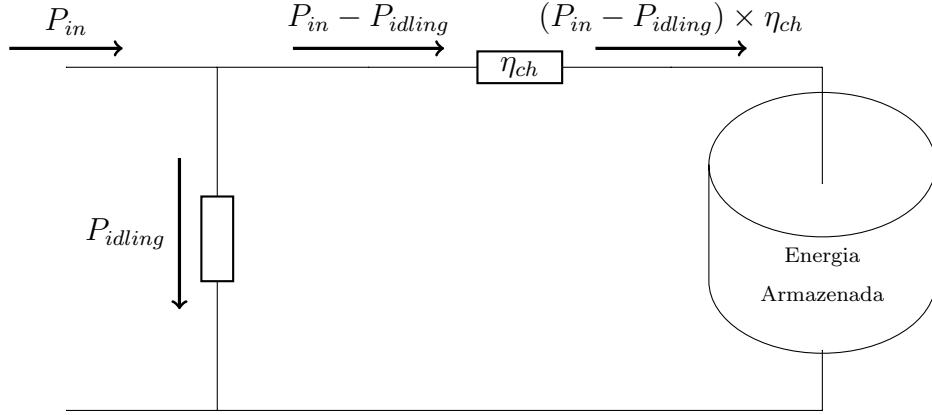


Figura 2: Diagrama do modelo do elemento *Storage* do OpenDSS no estado de Carga

Adicionando as perdas por inatividade em 5, obtem-se as perdas totais:

$$Perdas_{totais}[t] = P_{out}[t] \times \left( \frac{1}{\eta_{dch} - 1} \right) + \frac{1}{\eta_{dch}} \times P_{idling}[t] \quad [W] \quad (6)$$

A potência que, de fato, descarrega o armazenador de energia ideal é dada por:

$$P_{outEfetiva}[t] = \frac{P_{out}[t] + P_{idling}[t]}{\eta_{dch}} \quad [W] \quad (7)$$

Portanto, a energia armazenada um passo de tempo após o instante  $t$ , isto é,  $t + \Delta t$ , é dada por:

$$\begin{aligned} E[t + \Delta t] &= E[t] - P_{outEfetiva}[t] \times \Delta t \\ E[t + \Delta t] &= E[t] - \frac{P_{out}[t] + P_{idling}[t]}{\eta_{dch}} \times \Delta t \end{aligned} \quad (8)$$

### 5.3 Estado de Inatividade

No estado de inatividade, as perdas por inatividade são supridas pela rede, ou seja, não há alteração no estado de carga do armazenador de energia. Em outras palavras, o armazenador funciona como uma carga. Por esse motivo, apesar do parâmetro  $kW$  do armazenador ser nulo, os resultados do fluxo de potência mostram que há uma certa potência sendo consumida.

Como já mencionado, as perdas por inatividade são modeladas por uma impedância constante a partir de uma porcentagem da potência nominal do elemento armazenador de energia. No OpenDSS, os parâmetros do elemento *storage* utilizados para especificar essa perda são o *%idlingkW* e o *%idlingkvar*. Note que essas perdas podem ser tanto ativa como reativa.

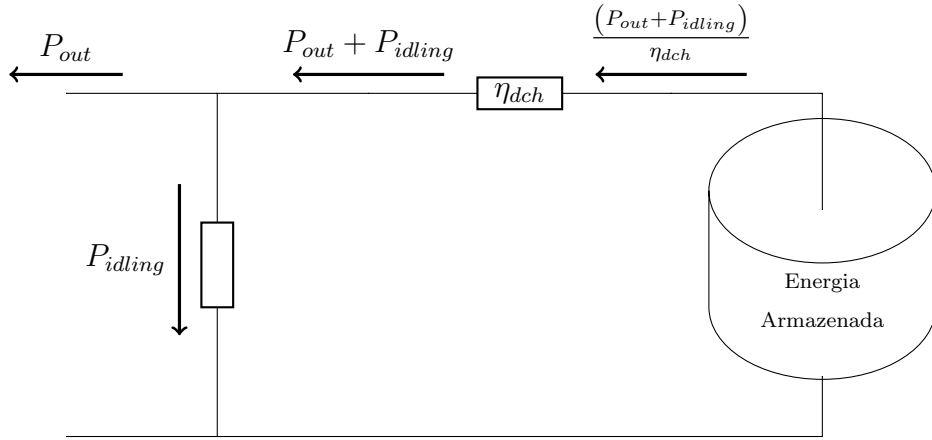


Figura 3: Diagrama do modelo do elemento *Storage* do OpenDSS no estado de Descarga

As potências ativa,  $P_n$ , e reativa,  $Q_n$ , nominais de uma carga trifásica conectada em estrela dissipadas por uma carga puramente resistiva, com resistência  $R$ , e uma carga puramente reativa, com reatância  $X$ , respectivamente, na condição de tensão nominal de linha,  $\dot{V} = \dot{V}_{L_n}$ , são dadas por:

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{|\dot{V}_{L_n}|^2}{R} \\ Q_n &= \frac{|\dot{V}_{L_n}|^2}{X} \end{aligned} \quad (9)$$

No nosso caso, as perdas  $P_n$  e  $Q_n$  são as perdas nominais por inatividade. A relação entre essas perdas e os parâmetros  $\%idlinkW$ ,  $\%idlinkvar$  e a potência nominal do elemento *Storage*, especificada pelo parâmetro  $kWrated$ , é dada por:

$$\begin{aligned} P_n &= \%idlinkW \times kWrated \times 10 \quad [W] \\ Q_n &= \%idlinkvar \times kWrated \times 10 \quad [var] \end{aligned} \quad (10)$$

**Observação 3:** Note que a perda reativa tem como base a potência ativa nominal do elemento.

De (9) e (10), podemos dizer então que:

$$\begin{aligned} R &= \frac{|\dot{V}_{L_n}|^2}{\%idlinkW \times kWrated \times 10} \quad [\Omega] \\ X &= \frac{|\dot{V}_{L_n}|^2}{\%idlinkvar \times kWrated \times 10} \quad [\Omega] \end{aligned} \quad (11)$$

Podemos definir ainda uma admitância,  $\bar{Y}_{idling}$ , dada por:

$$\bar{Y}_{idling} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j \times X} \quad [S]$$

$$\bar{Y}_{idling} = (\%idlinkW - j \times \%idlinkvar) \times \frac{kWrated \times 10}{|\dot{V}_{L_n}|^2} \quad [S] \quad (12)$$

Essa admitância é, em última instância, o modo como as perdas por inatividade são modeladas. Uma expressão mais genérica, que leva em conta a possibilidade de o elemento armazenador ser monofásico ou trifásico é dada por

$$\bar{Y}_{idling} = (\%idlinkW - j \times \%idlinkvar) \times \frac{kWrated \times 10}{|\dot{V}_{F_n}|^2 \times N_{fases}} \quad [S] \quad (13)$$

onde  $\dot{V}_{F_n}$  é a tensão nominal de fase e  $N_{fases}$  é o número de fases do elemento.

Por fim, supondo um elemento armazenador trifásico, a perda por inatividade é dada de acordo com a seguinte expressão:

$$\bar{S}_{idling} = \sum_{i=1}^3 \bar{Y}_{idling}^* \times |\dot{V}_i|^2 \quad [VA] \quad (14)$$

onde  $\dot{V}_i$  é a tensão efetivamente aplicada na fase  $i$ , dada pela diferença entre a tensão na fase  $i$  e a tensão de neutro, para conexão em estrela isolada, a diferença entre fases subsequentes, para conexão em delta, e a tensão fase-terra para conexão em estrela aterrada.

**Observação 4:** Se a conexão do elemento é delta,  $\bar{Y}_{idling}$  é dividido por três para satisfazer a conversão delta-estrela e manter as mesmas perdas na condição nominal.

## 6 Modos de Despacho

O elemento armazenador de energia apresenta 5 modos de despacho, dos quais três (Padrão, Nível de Carga e Preço) são acionados por dois gatilhos, um de carga, chamado de *ChargeTrigger*, e um de descarga, chamado de *DischargeTrigger*. De um modo geral, o elemento *storage* opera em um determinado estado até que algum dos seguintes eventos aconteça:

- A energia armazenada atinja a capacidade máxima, quando no estado de carga: nesse caso, o armazenador muda automaticamente para o estado de inatividade;
- A energia armazenada atinja a sua reserva mínima, quando no estado de descarga: nesse caso, o armazenador muda automaticamente para o estado de inatividade;



- Algum gatilho seja disparado: nesse caso, o armazenador muda automaticamente para o estado determinado pelo gatilho, isto é, caso o gatilho de carga (*ChargeTrigger*) seja disparado, o armazenador muda para o estado de carga, e, caso o gatilho de descarga (*DischargeTrigger*) seja disparado, o armazenador muda para o estado de descarga;
- O usuário selecione diretamente um estado: isso pode ser feito através do parâmetro *State*. Caso o estado de inatividade seja selecionado, o armazenador muda automaticamente para o mesmo. Caso os estados de carga ou descarga tenham sido selecionados, o armazenador muda automaticamente para o respectivo estado desde que as condições da energia armazenada no elemento sejam satisfeitas. Caso contrário, o elemento entra automaticamente no estado de inatividade.

## 6.1 “Padrão” - Default

Nesse modo, os gatilhos de carga e descarga seguem uma curva de carga (*loadshape*) especificada pelo usuário. A regra é que sempre que o valor da curva de carga é maior que o valor especificado pelo gatilho de descarga, o armazenador de energia descarrega à uma potência fixa, definida pela taxa de descarga *%Discharge*. A descarga continua até que a capacidade máxima de descarga seja atingida ou a curva de carga assuma um valor menor que o gatilho de descarga. De modo análogo, sempre que o valor da curva de carga é menor que o valor especificado pelo gatilho de carga, o elemento carrega à uma potência constante, até que a curva de carga assuma um valor maior que o gatilho de carga ou o elemento se encontre completamente carregado. Sobreposto à regra acima, há um critério que, quando especificado, é prioritário em relação ao gatilho de carga. Esse critério é temporal e é definido pelo parâmetro *TimeChargeTrigger*. Corresponde basicamente à uma hora do dia na qual o carregamento do armazenador de energia é ativado, mesmo que a carga da curva de carga não seja inferior que o valor especificado pelo gatilho de carga. Esse mecanismo é normalmente utilizado para carregar um armazenador de energia durante a madrugada, quando a demanda é baixa, para garantir que o armazenador de energia esteja completamente carregado para a demanda de pico do dia seguinte.

## 6.2 “Seguidor” - Follow

Como o próprio nome sugere, nesse modo, o carregamento e o descarregamento do armazenador de energia obedecem uma curva de carga (*loadshape*) até que o armazenador esteja completamente carregado ou descarregado até a sua capacidade máxima ou mínima, respectivamente, sendo que o elemento é descarregado quando a curva de carga apresenta valores positivos e carregado quando a curva de carga apresenta valores negativos. As taxas de carga e descarga são variáveis e determinadas pelo produto entre a potência nominal do armazenador, definida pelo parâmetro *kWrated* e o valor definido na curva de despacho. Portanto, para manter o elemento no estado de inatividade, basta especificar valores nulos na curva de carga.

### 6.3 “Nível de Carga” - Loadlevel e “Preço” - Price

Nesses dois modos, os gatilhos de carga e descarga também são utilizados, porém eles são aplicados a variáveis globais, isto é, aplicadas a todo o sistema, o que pode simular o efeito de uma central de controle responsável por uma grande quantidade de armazenadores de energia, por exemplo.

No caso do modo por preço, ao invés de se utilizar um objeto *loadshape*, utiliza-se uma curva definida como um objeto do tipo *Priceshape*, não normalizada. Essa curva é constituída por um vetor de preços, normalmente \$/MWh. Nessa situação, os gatilhos devem ser definidos como preços e a regra é que sempre que o preço da energia definido no gatilho de carga é maior que o preço no instante considerado, o armazenador é carregado. Em outras palavras, o gatilho de carga representa o máximo preço da energia no qual o elemento ainda pode ser carregado (caso já não tenha sido completamente carregado). O gatilho de descarga funciona do modo inverso. Ele representa o mínimo preço da energia no qual o elemento pode ser descarregado (caso ainda não tenha sido descarregado até o limite).

A mesma lógica se aplica no modo por nível de carga. Nesse modo, a curva de carga global é definida como um objeto do tipo *loadshape*. Os comandos utilizados para definir essas curvas se encontram no *script* do OpenDSS abaixo:

```
// Definição de uma curva de preço
New PriceShape.Price interval=1 npts=24
~ price = [75, 68, 67, 69, 71, 75, 75, 80, 80, 80, 90, 90, 90, 95, 95, 95, 105,
105, 110, 110, 110, 90, 90, 90]

// Atribuição de uma curva de preço global à simulação
Set pricecurve = Price

// Atribuição de um preço global específico
Set pricesignal = 100 // Utilizado quando se deseja atribuir um preço manualmente

// Atribuição de uma curva de carga global à simulação
Set defaultdaily = Curva_de_carga_diaria_x //deve ser utilizada quando a simulação
realizada for uma simulação diária
Set defaultyearly = Curva_de_carga_anual_x //deve ser utilizada quando a simulação
realizada for uma simulação anual

//Opcional
Set loadmult = 1.1 //valor em pu utilizado como fator multiplicativo para as curvas
de carga. Cuidado: este parâmetro pode afetar as curvas de cargas dos elementos
Load (checar o parâmetro status dos elementos Load)
```

### 6.4 “Externo” - External

Nesse modo, o armazenador não determina o seu estado por conta própria. O responsável por isso passa a ser um controlador, chamado de *StorageController*. Esse modo é ativado automaticamente quando se associa um *StorageController* a um armazenador de energia.

É importante salientar que o estado desse elemento pode ser alterado diretamente a partir de um *script* na linguagem de programação do OpenDSS ou através da interface COM, a partir de um

programa externo.

## 6.5 Despacho de Potência Reativa

Apesar do elemento *Storage* do OpenDSS não apresentar um inversor no seu modelo, ele também permite o despacho de potência reativa, que pode ser definida através do parâmetro *pf* (de “*power factor*”) ou do parâmetro *kvar*. No primeiro caso, a potência reativa é calculada com base na potência ativa a ser despachada em um dado instante e o fator de potência especificado. Um fator de potência especificado com valor positivo implica em potência ativa e reativa fluindo no mesmo sentido, enquanto que um fator de potência negativo implica em potência ativa e reativa fluindo em sentidos opostos, ou seja, o sentido da potência reativa fica atrelado à potência ativa quando ela é especificada através do fator de potência. Portanto, se durante a simulação o elemento armazenador sofre cargas e descargas, a potência reativa despachada segue essa mudança de sentido do fluxo de energia ativa para cada passo de simulação.

Quando se deseja um despacho de potência reativa independente da potência ativa, é necessário utilizar o parâmetro *kvar* em conjunto com o parâmetro *kW*.

## 7 Exemplos de Códigos

Nessa seção são apresentados exemplos do elemento *storage* operando em cada um dos modos descritos. Para isso, utilizaremos um circuito simples, com um *storage* conectado diretamente à uma fonte de tensão trifásica, conforme a figura 4 abaixo. No primeiro exemplo, procuraremos mostrar com maiores detalhes todos os aspectos da operação do modelo. Nos exemplos seguintes, focaremos nos aspectos das condições que determinam o despacho do elemento armazenador em si.

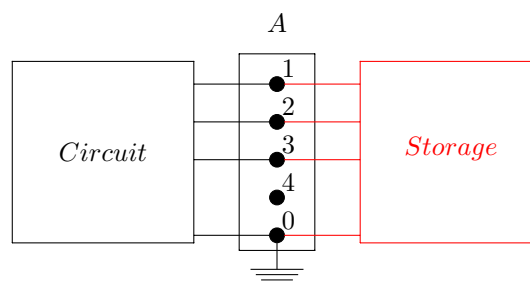


Figura 4: Elemento *storage* conectado diretamente à uma fonte de tensão

### 7.1 Modo de despacho “Padrão”

No *script* do OpenDSS abaixo, criamos um *loadshape* com a curva de despacho do armazenador. Note que o seu estado inicial é definido como estado de inatividade e o seu estado de carga estabelecido em 50%. A figura 5 apresenta a evolução do estado de carga do armazenador, a curva de despacho e os gatilhos de carga e descarga. A figura 6 apresenta as potências de saída e entrada no

armazenador, bem como as perdas totais e em vazio. Essas curvas foram levantadas a partir dos monitores adicionados no *script*.

```
! Storage – Modo Default
Clear

New Circuit.Source bus1=A basekv=0.48 phases=3 pu=1

New LoadShape.dispatch_shape interval=1 npts=24
~ mult = [0.380, 0.220, 0.247, 0.280, 0.313, 0.370, 0.589, 0.672, 0.7477, 0.832,
          0.88, 0.94, 0.989, 0.985, 0.98, 0.9898, 0.999, 1.0, 0.958, 0.936, 0.913, 0.800,
          0.720, 0.610]

New Storage.Storage1 phases=3 bus1=A kv=0.48 pf=1 kWrated=50 %reserve=20
~ kWhrated= 500 %stored=50 state=idling debugtrace=yes dispmode=default model=1 daily
  =dispatch_shape
~ ChargeTrigger = 0.34 DischargeTrigger = 0.85

New Monitor.Mon_Storage1_State element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=3
New Monitor.Mon_Storage1_Powers element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=1 ppolar=No

Set voltagebases = [0.48]
Calc voltagebases

Set mode=Daily
Solve

Plot Monitor object=Mon_Storage1_State channels=(1 2 3 4 5 6 7)
Plot Monitor object=Mon_Storage1_Powers channels=(1 3 5)
```

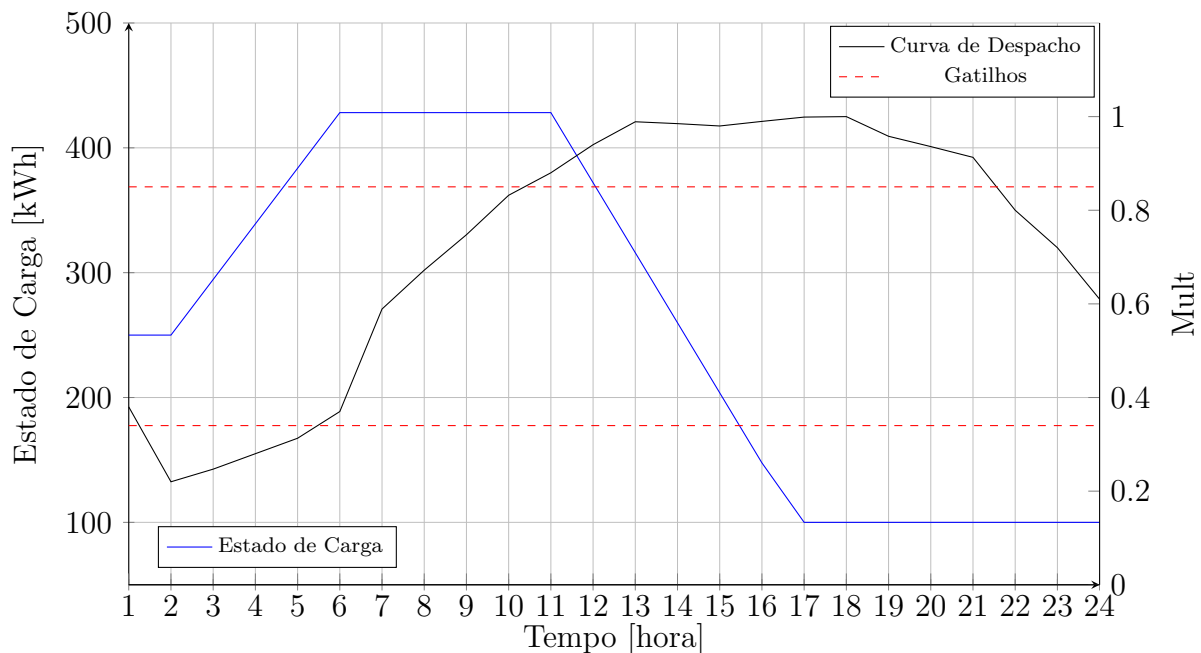


Figura 5: Estado de carga, curva de despacho e gatilhos de carga e descarga do armazenador no modo padrão (exemplo 7.1)

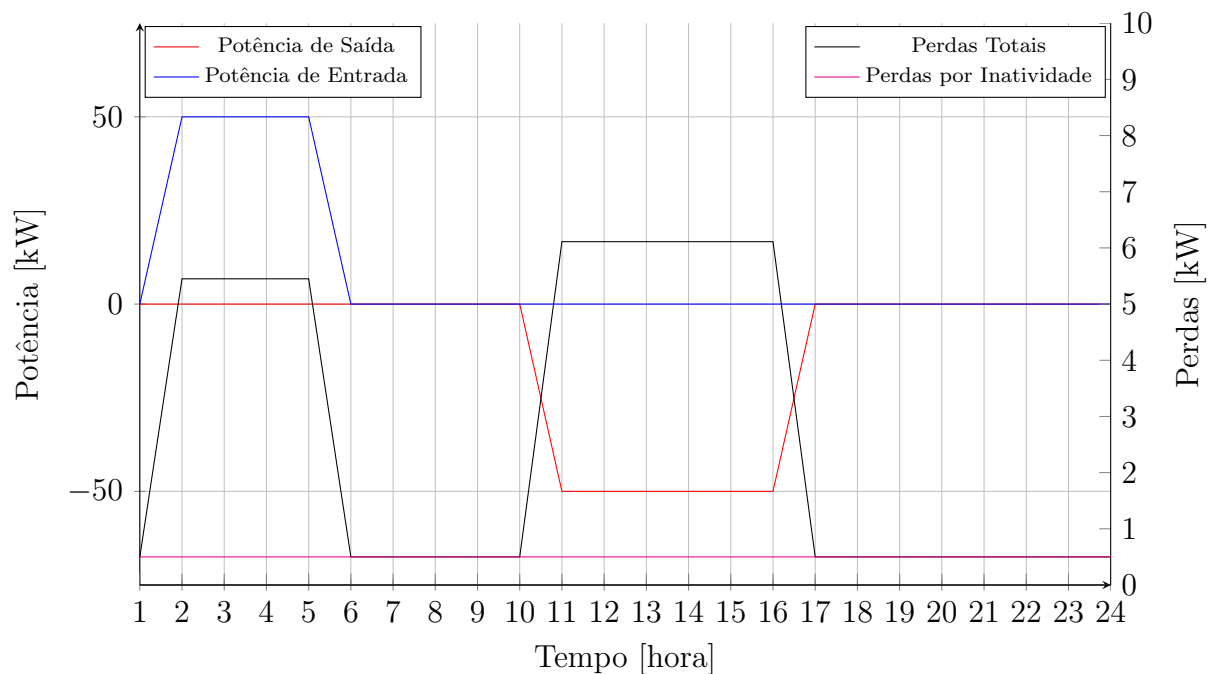


Figura 6: Potências de entrada e saída e perdas totais e em vazio do armazenador (exemplo 7.1)

**Observação 5:** Nos plots do OpenDSS, os dados de cada passo de simulação são interpolados. Porém, perceba que o que vale são os valores em cada passo de simulação em si. Para manter a semelhança ao modo como os plots do OpenDSS são gerados no DSSView, também mantivemos a interpolação entre os pontos de cada passo de tempo. DSSView é o programa que tem a função de plotar os gráficos solicitados pelo usuário a partir da interface do OpenDSS, esse programa se encontra na mesma pasta que o OpenDSS.exe.

A operação do armazenador é sumarizada abaixo:

- **01:00hr - 02:00hr** : Armazenador com 50% do estado de carga (250 kWh), e operando no estado ilhado. Curva de despacho acima do gatilho de carga e abaixo do gatilho de descarga.
- **02:00hr - 06:00hr** : Armazenador começa a carregar à taxa de 50 kW (kWrated) a partir da hora 2, pois a curva de despacho assume um valor abaixo do gatilho de carga.
- **06:00hr - 11:00hr** : Às 06:00hr, a curva de despacho fica acima do gatilho de carga e, portanto, o carregamento do armazenador cessa.
- **11:00hr - 17:00hr** : Às 11:00hr, a curva de despacho assume um valor acima do gatilho de descarga. Portanto, o armazenador passa a descarregar à uma taxa de 50 kW. Porém, às 17:00hr, ele atinge o seu estado de carga mínimo (100 kW, 20% de kWrated) e, portanto, a descarga do armazenador é interrompida, mesmo com a curva despacho tendo um valor acima do gatilho de descarga.
- **17:00hr - 24:00hr** : O armazenador permanece no estado de inatividade, com o seu estado de carga constante.

Em relação às perdas, note que as perdas por inatividade permanecem durante todo o dia simulado e elas parecem constantes. De fato, a variação no seu valor é desprezível pois nesse exemplo, conectamos

o elemento armazenador diretamente ao elemento circuito, isto é, as tensões no terminal do elemento armazenador possui uma variação desprezível. Por fim, perceba que as perdas totais são diferentes quando o armazenador carrega e descarrega, mesmo a potência sendo a mesma em ambos os casos. Esse é um fato interessante e está perfeitamente de acordo com o modelo apresentado nas seções 5.1 e 5.2. Perceba que, durante o estado de carga, o montante de potência que atravessa o bloco de perdas de carga é igual a potência que entra no armazenador (no nosso caso, 50 kW) menos as perdas por inatividade (no nosso caso, aproximadamente 0.5 kW, que equivale ao valor default de 1% de *kWrated*), conforme a equação 1, enquanto que, no estado de descarga, a potência que atravessa o bloco de perda de descarga é a soma da potência de saída com as perdas por inatividade, conforme a equação 5. Já que não declaramos explicitamente o valor das eficiências de carga e descarga ( $\eta_{ch}$  e  $\eta_{disch}$ , respectivamente), ambos possuem o valor *default* de 90%. Portanto, considerando o intervalo de tempo em que o armazenador carrega e descarrega no nosso exemplo, temos que

$$\begin{aligned} Perdas_{descarga} &= (50 + 0.5) \times \left( \frac{1}{0.9} - 1 \right) = 5.61 \text{ kW} \\ Perdas_{carga} &= (50 - 0.5) \times (1 - 0.9) = 4.95 \text{ kW} \end{aligned}$$

Portanto, as perdas totais durante a carga e descarga são

$$\begin{aligned} P_{total_{descarga}} &= 5.61 + 0.5 = 6.11 \text{ kW} \\ P_{total_{carga}} &= 4.95 + 0.5 = 5.45 \text{ kW} \end{aligned}$$

**Observação 6:** Conforme apresentado na seção 5.3, perceba que, enquanto o armazenador se encontra no estado ilhado, ele ainda consome uma potência referente às suas perdas ativas por inatividade, porém, essas perdas não são supridas pela energia do armazenador, mas sim, pela rede (note que o estado de carga permanece constante nesse estado).

## 7.2 Modo de despacho “Seguidor”

No *script* do OpenDSS abaixo, um novo *loadshape* foi criado, com a curva de despacho do armazenador no modo seguidor. A figura 7 apresenta a evolução do estado de carga e a curva de despacho do armazenador. A figura 8 apresenta as potências de saída e entrada no armazenador. Essas curvas foram levantadas a partir dos monitores adicionados no *script*.

```
! Storage – Modo Seguidor
Clear

New Circuit.Source bus1=A basekv=0.48 phases=3 pu=1

New LoadShape.dispatch_shape interval=1 npts=24
~ mult = [0, -1.0, -1.0, -1.0, -0.5, -0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.5, 0.75, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 0.75, 0.5, 0, 0]

New Storage.Storage1 phases=3 bus1=A kv=0.48 pf=1 kWrated=50 %reserve=20
~ kWhrated= 500 %stored=50 state=idling debugtrace=yes dispmode=follow model=1 daily=
dispatch_shape

New Monitor.Mon_Storage1_State element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=3
```

```
New Monitor.Mon_Storage1_Powers element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=1 ppolar=No

Set voltagebases = [0.48]
Calc voltagebases

Set mode=Daily
Solve

Plot Monitor object=Mon_Storage1_State channels=(1 2 3 4 5 6 7)
Plot Monitor object=Mon_Storage1_Powers channels=(1 3 5)
```

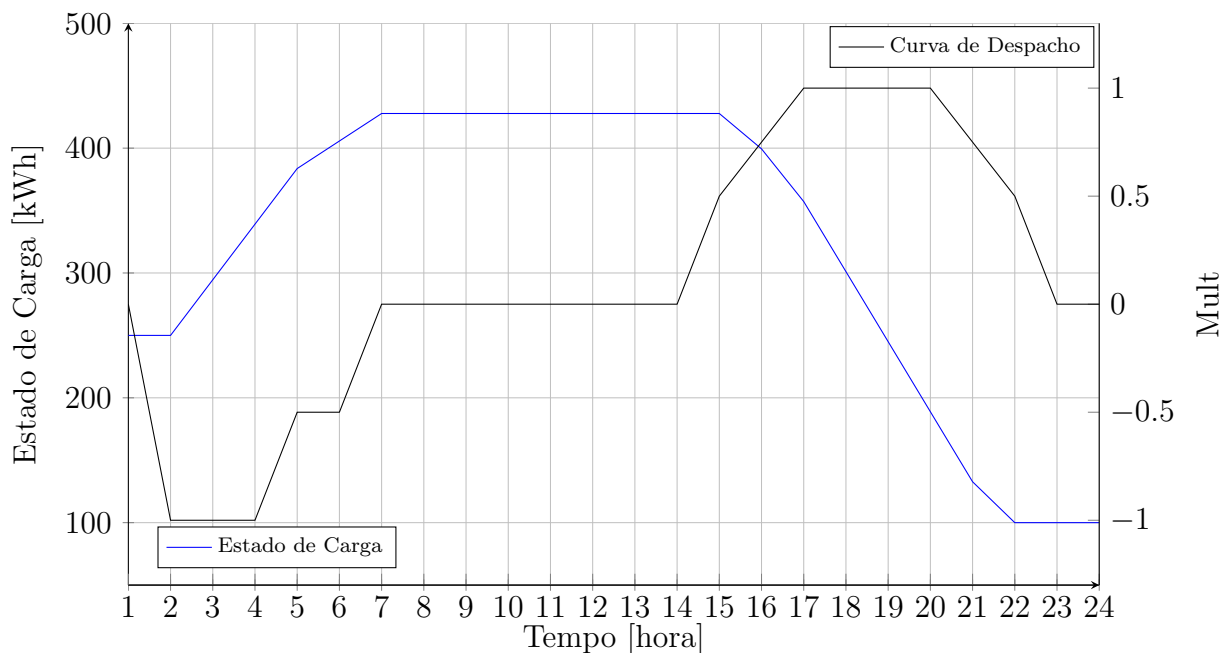


Figura 7: Potências de entrada e saída e perdas totais e em vazio do armazenador no modo seguidor (exemplo 7.2)

Note que um valor de despacho negativo significa potência “entrando” no armazenador, ou seja, o armazenador carrega, enquanto que com um valor positivo, o armazenador descarrega. Além disso, observe a semelhança entre a curva de despacho, figura 7 e as potência de entrada e saída do armazenador, figura 8. Como apresentado na seção 6.2, nesse modo de operação, a potência de entrada e saída são determinadas pelo produto entre os valores da curva de despacho e a potência nominal do elemento. Por exemplo, na hora 03:00hr, o valor da curva de despacho é -1.0, o que leva o armazenador carregar à sua taxa nominal, de 50 kW. Já na hora 15:00hr, o valor da curva de despacho é 0.5, o que leva o armazenador a descarregar a uma potência de 25 kW.

Para forçar o armazenador a entrar no estado ilhado, basta definir valores nulos na curva de despacho. Finalmente, vale lembrar que a curva de despacho só é obedecida enquanto o estado de carga do armazenador não atingiu o seu limite superior (completamente carregado) ou inferior (estado de carga igual ao seu valor mínimo, definido por *%reserve*), conforme pode ser observado na hora 22:00hr, em que a curva de despacho possui um valor de 0.5, porém a potência de saída é nula, devido ao fato da energia do armazenador ter atingido 100 kW (20% de 500 kW).

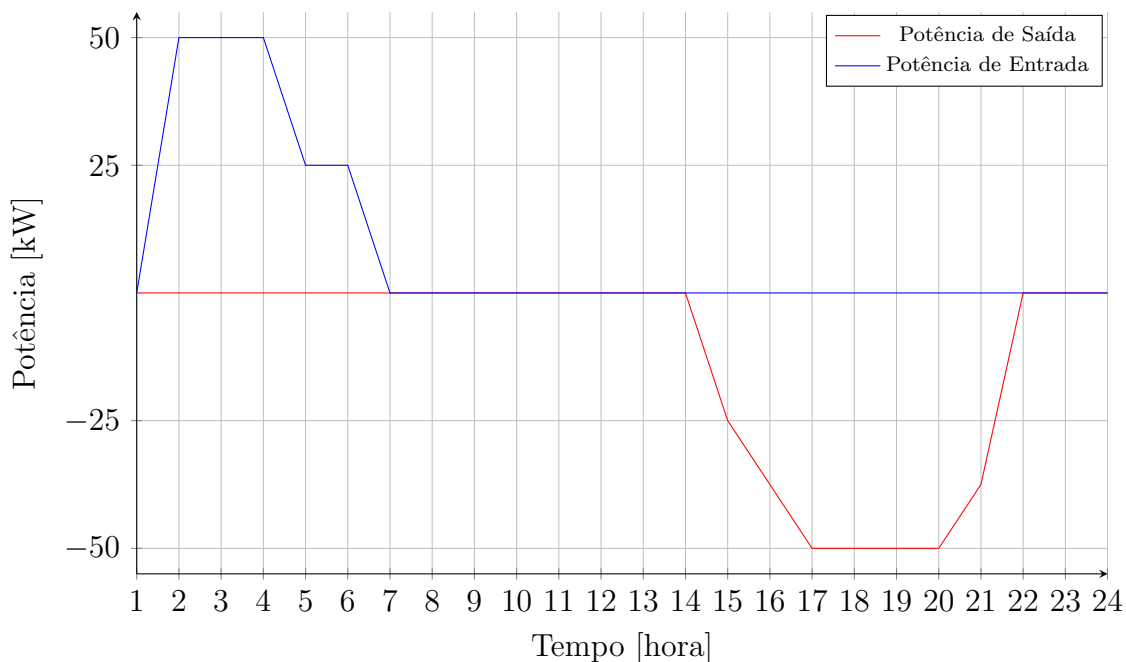


Figura 8: Potências de entrada e saída e perdas totais e em vazio do armazenador (exemplo 7.2)

### 7.3 Modo “Nível de Carga” - Loadlevel e “Preço” - Price

Como os dois modos de despacho funcionam de modo similar, mostraremos a operação do elemento armazenador apenas em um deles. No *script* do OpenDSS abaixo, uma curva de preço, objeto da classe *PriceShape* foi criado, com uma curva de preço de energia hipotética. Note que esse objeto se assemelha bastante a um *loadshape*. Além disso, é necessário definir essa curva de preço como a curva global da simulação através do comando “*Set pricecurve*”. A figura 9 apresenta a evolução do estado de carga e a curva de preço do armazenador. A figura 10 apresenta as potências de saída e entrada no armazenador. Essas curvas foram levantadas a partir dos monitores adicionados no script.

```
! Storage – Modo Price
Clear

New Circuit.Source bus1=A basekv=0.48 phases=3 pu=1

New PriceShape.Price interval=1 npts=24
~ price = [75, 68, 67, 69, 71, 75, 75, 80, 80, 80, 90, 90, 90, 95, 95, 95, 105,
105, 110, 110, 110, 90, 90, 90]

New Storage.Storage1 phases=3 bus1=A kv=0.48 pf=1 kWrated=50 %reserve=20
~ kWhrated= 500 %stored=50 state=idling debugtrace=yes dispmode=price model=1
~ DischargeTrigger = 100 ChargeTrigger= 74

New Monitor.Mon_Storage1_State element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=3
New Monitor.Mon_Storage1_Powers element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=1 ppolar=No

Set voltagebases = [0.48]
Calc voltagebases
```



```
Set pricecurve=Price
Set mode=Daily
Solve
```

```
Plot Monitor object=Mon_Storage1_State channels=(1 2 3 4 5 6 7)
Plot Monitor object=Mon_Storage1_Powers channels=(1 3 5)
```

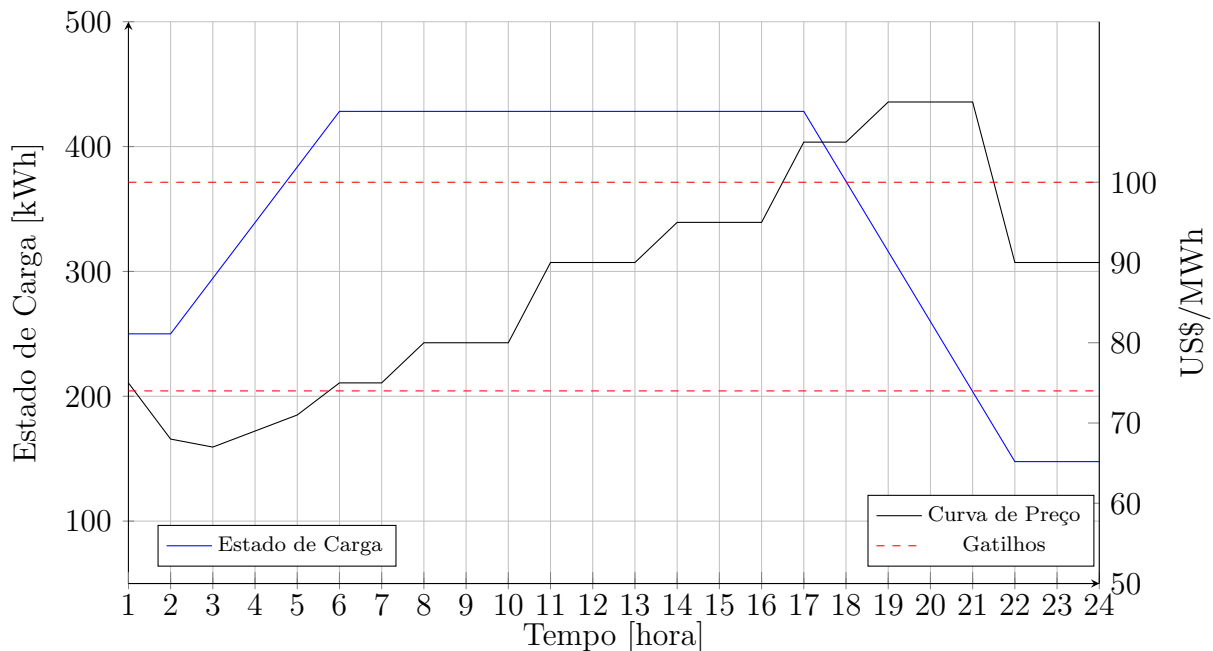


Figura 9: Estado de carga, curva de despacho e gatilhos de carga e descarga do armazenador no modo Preço (exemplo 7.3)

Observe que o armazenador carrega à sua potência nominal quando o preço da energia se encontra abaixo do gatilho de carga e descarrega à mesma potência quando o preço da energia se encontra acima do gatilho de descarga.

## 7.4 Controle Manual de despacho com despacho de Potência Reativa

Nesse exemplo, mostraremos como é possível fazer um controle “manual” do despacho do armazenador de energia. Além disso, também utilizaremos o armazenador para fornecer/absorver reativos. Para isso, devemos modificar o estado do armazenador manualmente, antes de simular o passo de simulação no qual desejamos alterar o estado do armazenador. Por esse motivo, devemos quebrar a simulação e não simular, por exemplo, mantendo o padrão dos exemplos já apresentados, as 24 horas de uma simulação diária de uma só vez.

O exemplo abaixo mostra a simulação de um elemento armazenador com um fator de potência negativo, que indica sentidos discordantes de potência ativa e reativa, no intervalo de 03:00 às 07:00hr e com um fator de potência positivo, que indica potência reativa concordante com o sentido da potência ativa, no intervalo de 18:00hr às 22:00hr.

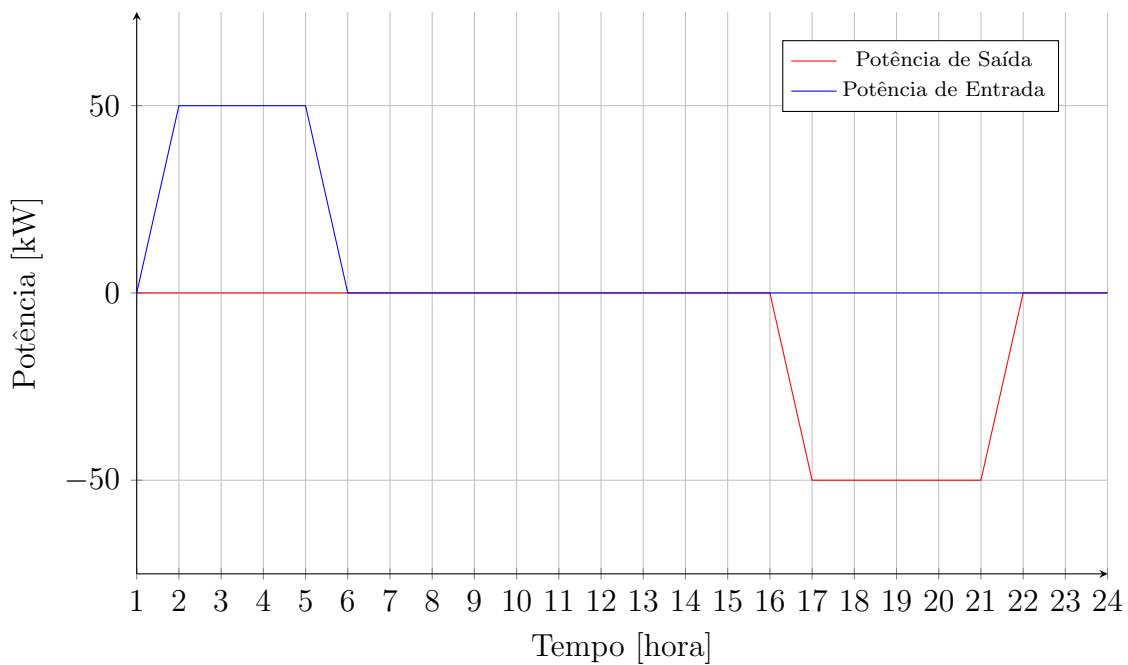


Figura 10: Potências de entrada e saída do armazenador (exemplo 7.3)

```
! Storage – Modo Manual com Reativos especificados com Fator de Potência
Clear

New Circuit.Source bus1=A basekv=0.48 phases=3 pu=1

New Storage.Storage1 phases=3 bus1=A kv=0.48 pf=1 kWrated=50 %reserve=20
~ kWhrated= 500 %stored=50 state=idling debugtrace=yes dispmode=External model=1

New Monitor.Mon_Storage1.State element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=3
New Monitor.Mon_Storage1.Powers element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=1 ppolar=No

Set voltagebases = [0.48]
Calc voltagebases

Set mode=Daily
Set stepsize=1h

// Armazenador ilhado nas duas primeiras horas
// 01:00hr – 02:00hr
Set number=2
Solve

// Armazenador carregando nas 5 horas seguintes com uma potência de 80% da potência
// nominal e um fator de potência de -0.95
// 03:00hr – 07:00hr
Edit Storage.Storage1 state=charging %charge=80 pf=-0.95
Set number=5
Solve
```

```
// Armazenador ilhado nas 10 horas seguintes
// 08:00hr – 17:00hr
Edit Storage.Storage1 state=idling
Set number= 10
Solve

// Armazenador descarregando nas 5 horas seguintes com potência nominal e um fator de
// potência de 0.95
// 18:00hr – 22:00hr
Edit Storage.Storage1 state=discharging %discharge=100 pf=0.95
Set number=5
Solve

// Armazenador ilhado nas 2 horas restantes do dia
// 23:00hr – 24:00hr
Edit Storage.Storage1 state=idling
Set number= 2
Solve

Plot Monitor object=Mon_Storage1_State channels=(1 2 3 4 5 6 7)
Plot Monitor object=Mon_Storage1_Powers channels=(1 3 5)
Plot Monitor object=Mon_Storage1_Powers channels=(2 4 6)
```

A figura 11 abaixo mostra as potências ativa e reativa que “entram” no terminal do armazenador. Perceba que o fator de potência definido é aplicado sobre a potência ativa de saída (parâmetro *%charge* aplicado à potência nominal, *kWrated*).

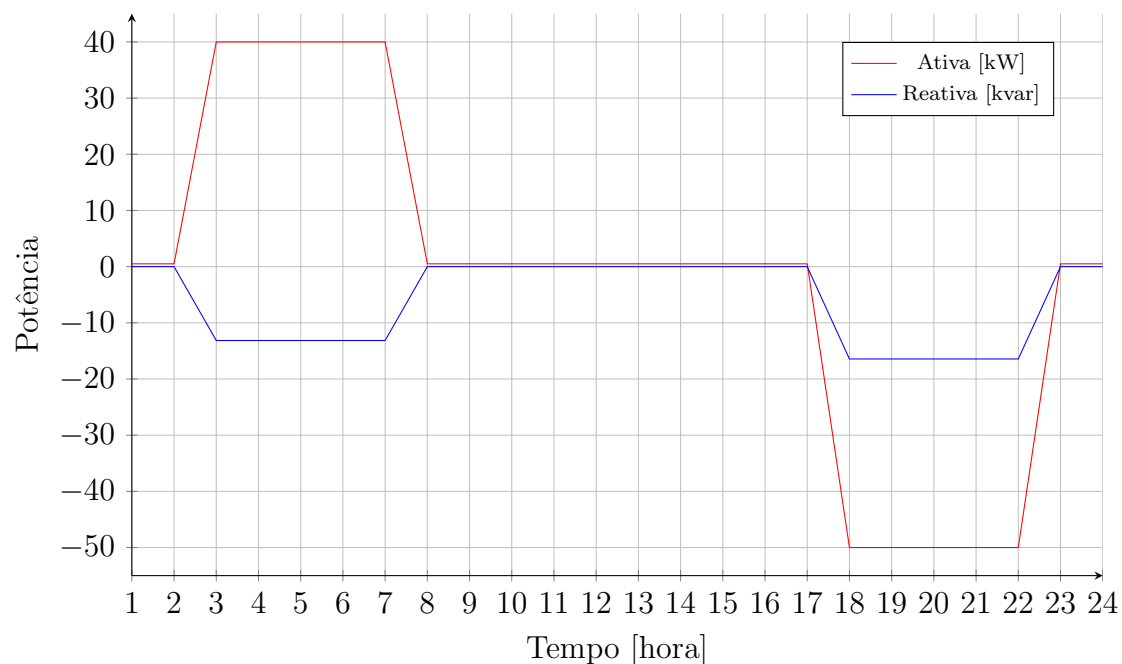


Figura 11: Potências que “entram” no terminal do armazenador (exemplo 7.4, com potência reativa definida através do parâmetro *pf*)

Vamos verificar o que acontece nos seguintes intervalos:

- **03:00hr - 07:00hr** : o armazenador entra no estado de carga, potência ativa “entrando” no armazenador, a uma taxa de 80% da potência nominal, igual a 40 *kW*. O fator de potência é definido como -0.95, o que significa potência reativa e ativa em sentidos contrários, isto é, o armazenador injeta reativos na rede. O valor da potência reativa trifásica injetada na rede pode ser calculado como:  $Q = 40 * \tan(\cos^{-1}(0.95)) = 13.147 \text{ kvar}$
- **18:00hr - 22:00hr** : o armazenador entra no estado de descarga, potência ativa “saindo” do armazenador à potência nominal, igual a 50 *kW*. O fator de potência é definido como 0.95, o que significa potência reativa e ativa com sentidos concordantes, isto é, o armazenador injeta reativos na rede. O valor da potência reativa trifásica injetada pode ser calculado como:  $Q = 50 * \tan(\cos^{-1}(0.95)) = 16.434 \text{ kvar}$

Como já mencionado na seção 6.5, também é possível definir diretamente o valor da potência reativa fornecida/absorvida pelo armazenador de energia. Para isso, é necessário especificar a potência ativa e a reativa em um dado instante através dos parâmetros *kW* e *kvar*, conforme o script abaixo:

```
! Storage – Modo Manual com Reativos especificados com kvar
Clear

New Circuit.Source bus1=A basekv=0.48 phases=3 pu=1

New Storage.Storage1 phases=3 bus1=A kv=0.48 pf=1 kWrated=50 %reserve=20
~ kWhrated= 500 %stored=50 state=idling debugtrace=yes dispmode=External model=1

New Monitor.Mon_Storage1.State element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=3
New Monitor.Mon_Storage1.Powers element=Storage.Storage1 terminal=1 mode=1 ppolar=No

Set voltagebases = [0.48]
Calc voltagebases

Set mode=Daily

// Armazenador ilhado nas duas primeiras horas
// 01:00hr – 02:00hr
Set number=2
Solve

// Armazenador carregando nas 5 horas seguintes com uma potência ativa de 30kW e uma
// potência reativa de 5kvar
// 03:00hr – 07:00hr
Edit Storage.Storage1 state=charging %charge=60 kw=30 kvar=5
Set number=5
Solve

// Armazenador ilhado nas 10 horas seguintes
// 08:00hr – 17:00hr
Edit Storage.Storage1 state=idling
Set number= 10
Solve

// Armazenador descarregando nas 5 horas seguintes com uma potência ativa de 30kW e
// uma potência reativa de 10kvar
// 18:00hr – 22:00hr
Edit Storage.Storage1 state=discharging kw=30 kvar=10
```

```
Set number=5
Solve

// Armazenador ilhado nas 2 horas restantes do dia
// 23:00hr – 24:00hr
Edit Storage.Storage1 state=idling
Set number= 2
Solve

Plot Monitor object=Mon_Storage1_State channels=(1 2 3 4 5 6 7)
Plot Monitor object=Mon_Storage1_Powers channels=(1 3 5)
Plot Monitor object=Mon_Storage1_Powers channels=(2 4 6)
```

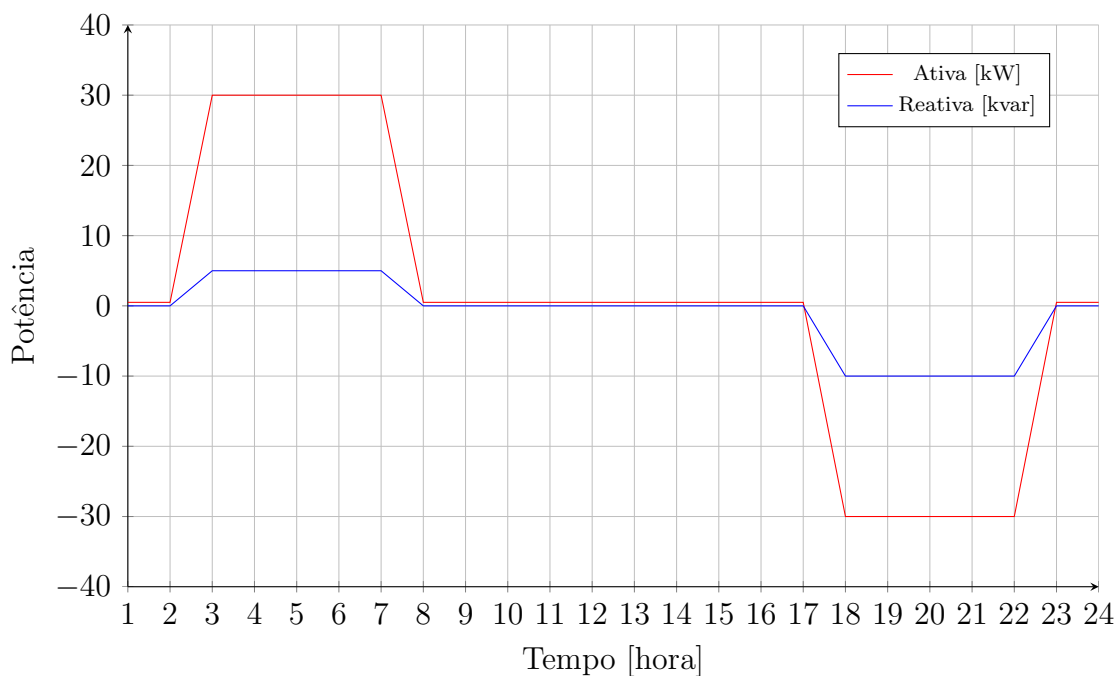


Figura 12: Potências que “entram” no terminal do armazenador (exemplo 7.4, com potência reativa definida através do parâmetro *kvar*)

**Observação 7:** Note que no intervalo de 03:00hr às 07:00hr, durante a carga do armazenador, definimos tanto *%charge* (tal que  $kW_{Rated} \times \%charge = kW$ ) quanto *kw*. A especificação de ambos parece ser redundante, porém, de acordo as simulações realizadas durante a elaboração dessa nota técnica, verificou-se que o armazenador só operava como desejado nessa situação. Essa redundância só foi necessária para o armazenador operando no estado de carga.

**Observação 8:** O elemento armazenador de energia possui uma propriedade, *kVA*, que pode ser utilizada para limitar a geração de potência reativa. Porém, até a versão do OpenDSS utilizada durante a elaboração dessa nota técnica, essa limitação só é realizada quando o armazenador opera com controle manual de despacho com despacho de potência reativa definida através do parâmetro *kvar* (ou seja, não vale para quando ela é definida através do parâmetro *pf*). Por default, esse parâmetro é definido como igual à potência ativa nominal do elemento, *kWrated*. Além disso, para que essa propriedade seja utilizada de modo correto, ela deve ser especificada antes de *kW* e *kvar*.

## 8 Comentários Adicionais

Esse material foi disponibilizado gratuitamente, porém, ao utilizá-lo, pedimos que as devidas referências sejam feitas.

Se você possui alguma dúvida ou encontrou algum erro nessa nota técnica, por favor, entre em contato conosco através do e-mail **[opendss.brasil@gmail.com](mailto:opendss.brasil@gmail.com)**.

## 9 Referências

- [1] Celso Rocha, Paulo Radatz: *Elemento Load do OpenDSS*, Março 2018. <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/OB0GTsIi12nHXS190NG1pOWRhZW8>.
- [2] Dugan, R. C., J. A. Taylor e D. Montenegro: *Energy Storage Modeling for Distribution Planning*. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(2):954–962, March 2017, ISSN 0093-9994.
- [3] Oliveira, C.B., H.P. Schmidt, N. Kagan e E.J. Robba: *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas*. Edgard Blücher, São Paulo, 2ª edição, 2000.
- [4] Rocha, Celso: *Análise e Mitigação de Impactos da Conexão de Geração Distribuída, Microgeração Distribuída e Armazenadores em Alimentadores de Distribuição Utilizando o Software OpenDSS*, Dezembro 2016. [https://sourceforge.net/p/electricdss/code/HEAD/tree/trunk/Distrib/Examples/Celso\\_Example/TCC\\_CelsoRocha.pdf](https://sourceforge.net/p/electricdss/code/HEAD/tree/trunk/Distrib/Examples/Celso_Example/TCC_CelsoRocha.pdf), Online; acessado em 29 de Maio de 2018.
- [5] Stevenson, W.D.: *Elements of power system analysis*. McGraw-Hill series in electrical engineering: Power and energy. McGraw-Hill, 1982, ISBN 9780070612792.