

# Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua: Estudo de Caso em um Edifício Comercial

Douglas P. Dias\*. Bruno S. Dupczak.\*  
Jackson Lago\*

\*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, CEP 88020-300  
BR (Tel: (48) 3211-6070; e-mail: douglas.pd@aluno.ifsc.edu.br, bruno.dupczak@ifsc.edu.br, jackson.lago@ifsc.edu.br)

**Abstract:** This article verified the need for improvements in the infrastructure of the electricity distribution systems, in view of the high number of electronic loads and distributed generation present in the daily life of the population. These loads require the conversion of energy from direct current to alternating current, or vice versa, to connect to the power grid, a fact that causes considerable energy losses in the system. Concerning solar energy, the photovoltaic arrangements generate energy in direct current making it necessary to use inverters to connect to the alternating current distribution network. Thus, this work proposes a direct current electrical network in commercial buildings, with a direct current distribution bus in  $\pm 185$  V. The commercial building presented has photovoltaic panels for distributed generation and battery bank which is responsible for storing the reserve power that will feed the system in case of non-power supply by the electric grid of the power distribution company. The results obtained in the simulations show that the direct current distribution system lost 6.4% less energy demanded by the grid compared to the traditional alternating current system.

**Resumo:** Esse artigo verificou a necessidade de melhorias na infraestrutura dos sistemas de distribuição de energia elétrica, tendo em vista o elevado número de cargas eletrônicas e geração distribuída presentes no cotidiano da população. Essas cargas necessitam da conversão de energia de corrente contínua para corrente alternada, ou vice-versa, para se conectar à rede elétrica, fato que gera perdas energéticas consideráveis no sistema. No caso do uso da energia solar, os arranjos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, tornando-se necessário o uso de inversores para se conectar à rede de distribuição em corrente alternada. Assim, neste trabalho propõe-se uma rede elétrica em corrente contínua a ser utilizada em edifícios comerciais, com barramento de distribuição em corrente contínua de  $\pm 185$  V. O edifício comercial apresentado possui painéis fotovoltaicos para geração distribuída e banco de baterias, utilizado para alimentar o sistema no caso de não fornecimento de energia pela rede elétrica da concessionária. Os resultados obtidos nas simulações, mostram que o sistema de distribuição em corrente contínua perdeu 6,4% a menos da energia demandada da rede em comparação com o sistema tradicional em corrente alternada.

**Keywords:** Energy distribution; Direct current; Alternating current; Electronic loads; Distributed generation; Energy efficiency.

**Palavras-chaves:** Distribuição de energia; Corrente contínua; Corrente alternada; Cargas eletrônicas; Geração distribuída; Eficiência energética.

## 1. INTRODUÇÃO

Motivado pelas condições ambientais e econômicas, existe uma tendência mundial para a utilização de fontes de energia renováveis (Elsayed et al. 2015). Nesse contexto, muitos consumidores residenciais, comerciais e industriais passaram a utilizar a energia solar fotovoltaica em seus estabelecimentos. No entanto, para que os arranjos fotovoltaicos possam se conectar à rede elétrica, é necessário o uso de inversores para converter a tensão contínua gerada pelos painéis para o padrão alternado da rede elétrica.

Muitas das cargas presentes em residências, edifícios comerciais e indústrias são do tipo eletrônicas, como fontes

de computadores e celulares, reatores eletrônicos, iluminação composta por lâmpadas de LED, refrigeração com sistema *inverter*, entre outras. Essas cargas, internamente, possuem um estágio de conversão de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), comumente empregando um retificador a diodos com filtro capacitivo. De acordo com Elsayed et. al. (2015) e Reed (2012), aproximadamente 30% da energia gerada em corrente alternada passa por um conversor eletrônico antes de ser utilizada por equipamentos. Este estágio retificador, além de dissipar energia, contribuiu para o surgimento de componentes harmônicas de corrente na rede elétrica.

Desta maneira, o emprego de uma rede em CC eliminaria ou concentraria um estágio de conversão e, conseqüentemente aumentaria a eficiência do sistema (Elsayed et al. 2015). Portanto, a utilização de uma instalação elétrica operando em corrente contínua pode contribuir para a redução das perdas, bem como colaborar com a melhoria da qualidade da energia elétrica presente na rede de distribuição.

A substituição da tensão de distribuição de CA para um nível em CC adequado, deslocará o local da conversão, uma vez que seria utilizado um retificador centralizado de maior porte ao invés de retificadores individuais de pequeno porte, fato que pode levar a um aumento da eficiência da instalação.

Assim, este trabalho tem como objetivo propor uma rede elétrica em corrente contínua, a ser utilizada em edifícios comerciais, aproveitando as tecnologias de proteção elétrica existentes no mercado, com o objetivo de obter maior eficiência se comparado ao caso de uma rede elétrica tradicional em corrente alternada.

## 2. DESCRIÇÃO DO MODELO

Nesta seção será apresentado o estudo de caso utilizado como modelo, um edifício comercial, bem como os elementos que o compõem, seus quantitativos e as características elétricas. Posteriormente, são exibidos dois sistemas de distribuição de energia da edificação, um em corrente alternada e outro em corrente contínua, a fim de comparar e analisar a eficiência energética entre ambos.

### 2.1 Estudo de Caso

O objeto de estudo para comparação da eficiência entre o sistema em CA e em CC consiste em um edifício comercial de médio porte, implantado na cidade de Florianópolis (SC), considerando construções similares encontradas na cidade. O edifício está orientado à Norte, possui 5 pavimentos, incluindo o andar térreo e sua potência instalada é de 419,5 kW. Na Fig. 1 é possível visualizar o edifício comercial proposto.

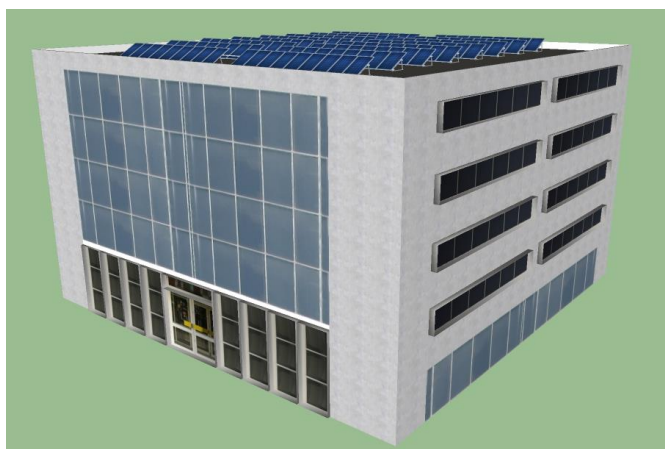


Fig. 1 Edifício comercial utilizado como modelo.

Como geração de energia elétrica, um sistema fotovoltaico com 380 módulos é conectado ao sistema de distribuição do edifício, fornecendo alimentação às cargas. Um banco de

baterias é conectado ao barramento de distribuição para o armazenamento de energia. Em função das baterias, quando ocorre uma falta na rede elétrica e o sistema da concessionária deixa de fornecer energia elétrica aos consumidores, esse sistema pode ser desconectado da rede e continuar fornecendo energia elétrica às suas cargas.

### 2.1.1 Rede de Distribuição em Corrente Alternada

O edifício conta com um elevado número de cargas eletrônicas. Para conectar-se à rede, sistemas como o de iluminação e de computadores necessitam da conversão CA-CC, e após CC-CC para adequar o nível de tensão. Já os sistemas de refrigeração e o elevador precisam de uma conversão CA-CC-CA. Além disso, para armazenamento de energia o edifício dispõe de um banco de baterias que se conecta à rede através de uma conversão CC-CC e após CC-CA. Da mesma forma, o sistema fotovoltaico necessita de um conversor CC-CC, responsável pelo rastreamento de máxima potência dos módulos (MPPT), e de um inversor (CC-CA) para a interface com a rede em CA.

Na Fig. 2 é possível verificar o modelo do sistema de distribuição da edificação em corrente alternada. Trata-se de uma rede de distribuição de energia elétrica trifásica.

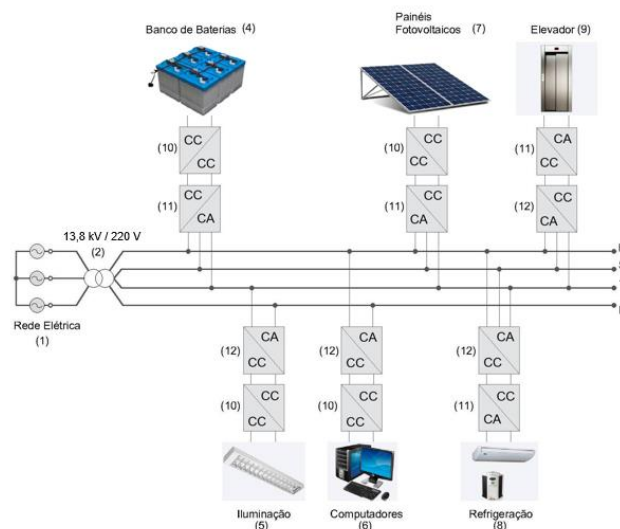


Fig. 2 Rede de distribuição trifásica utilizada no edifício.

### 2.1.2 Rede de Distribuição em Corrente Contínua

A Fig. 3 apresenta um modelo para o sistema de distribuição em corrente contínua do edifício. As cargas para esse segundo cenário são equivalentes às do sistema em corrente alternada apresentado no item 2.1.1. Ou seja, é composto pelos mesmos elementos, porém com a adição de um retificador bidirecional e diferenciação nos estágios de conversão.

O retificador bidirecional, elemento 3 da Fig. 3, realiza a interface entre a rede primária da concessionária (CA) e a rede de distribuição do edifício (CC), garantindo o fluxo bidirecional de energia além da conversão CA-CC. A utilização de um retificador centralizado de maior porte pode

aumentar a eficiência das instalações ao deslocar e concentrar os pontos de conversão, evitando assim, o uso de retificadores individuais de pequeno porte ao longo do barramento.

Entre o sistema fotovoltaico e o barramento de distribuição, é adicionado um conversor CC-CC que, além de adequar o nível de tensão é responsável pelo rastreamento de máxima potência dos módulos (MPPT). Também é inserido um conversor CC-CC entre a bateria e o barramento de distribuição, com o intuito de adequar os níveis de tensão e, ainda, para o conversor controlar a etapa de carregamento da bateria.

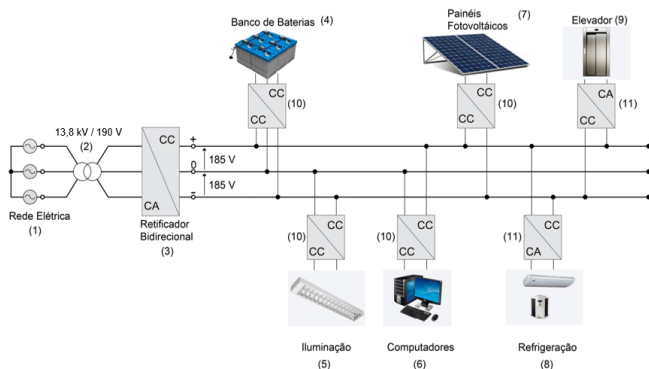


Fig. 3 Rede de distribuição em CC bipolar com  $\pm 185$  V.

Na rede de distribuição em CC (Fig. 3), a tensão de linha da rede elétrica de 13,8 kV é convertida para a tensão de linha de 190 V através do transformador e, após, convertida para tensão contínua de 370 V por meio do retificador bidirecional. Nesse sistema, adotou-se um barramento CC bipolar, que consiste em uma linha +185 V, uma linha de neutro e uma linha de -185 V. Esse tipo de barramento foi adotado devido aos níveis de tensão serem compatíveis com as tensões de operação dos equipamentos eletrônicos disponíveis atualmente no mercado, não havendo a necessidade de modificar a alimentação desses equipamentos.

Os níveis de tensão de  $\pm 185$  V foram escolhidos com base nos valores de  $\pm 170$  V encontrados na literatura, adicionando uma margem de tensão que permita a operação do retificador mesmo com variações da tensão da rede de alimentação em até 10%.

### 3. MODELAGEM DOS ELEMENTOS DA REDE

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de modelagem e simulação computacional do edifício objeto de estudo, na ferramenta de análise de sistemas *MATLAB/SIMULINK* (MathWorks, 1994-2020). A modelagem consistiu na construção do modelo computacional do sistema de distribuição de energia elétrica em corrente alternada e em corrente contínua, levando em consideração os elementos presentes na edificação, apresentados na seção anterior. São realizadas simulações da instalação em corrente alternada e em corrente contínua, no intuito de avaliar, no período de um ano, os ganhos da utilização da distribuição de energia elétrica em corrente contínua para o estudo de caso, com a diminuição de perdas e aumento da eficiência do sistema.

Salienta-se que neste trabalho, ainda que as cargas sejam majoritariamente eletrônicas, as distorções harmônicas não são consideradas. Além disso, as perdas no transformador são calculadas de maneira simples e não são contempladas perdas nos alimentadores e ramais de carga.

#### 3.1 Perdas nos Retificadores

Para este trabalho utilizou-se os valores de eficiência nas conversões CA-CC, CC-CC e CC-CA de acordo com estudos realizados em Liu e Li (2014) e Seo et al. (2011). Essa simplificação para os valores de eficiência dos conversores se dá pelo não conhecimento dos modelos exatos dos equipamentos, porém sabe-se que, na prática, a eficiência dos conversores varia de acordo com a potência processada por eles. Pela Tabela 1 é possível observar as eficiências das conversões anteriormente mencionadas.

Tabela 1. Eficiência nos conversores

Potência	100 W	1 kW	10 kW	100 kW
CA/CC	75%	81%	87%	93%
CC/CC	90%	92%	96%	97%
CC/CA	92%	92%	95%	95%

Ainda, os valores de eficiência nos equipamentos de conversão apresentados na Tabela 1 mostram-se de acordo com os valores de eficiência em conversores exibidos em Moia (2016) e Prabhala et al. (2018).

#### 3.2 Definições Gerais

Os sistemas de iluminação, refrigeração, computadores e o elevador foram modelados conforme apresentado na Fig. 4 e na Fig. 5. O modelo computacional recebe a curva com o comportamento da potência instalada ao longo do dia. Esta curva varia de acordo com os dias da semana, isto é, seu comportamento é diferente entre os dias úteis, sábados e domingos. Na sequência, o modelo entra no bloco denominado “Sistema X”, que representa os sistemas de iluminação, refrigeração, computadores ou elevador. Na saída do bloco, tem-se a potência elétrica necessária para alimentar o respectivo sistema, bem como as perdas a ele associadas.

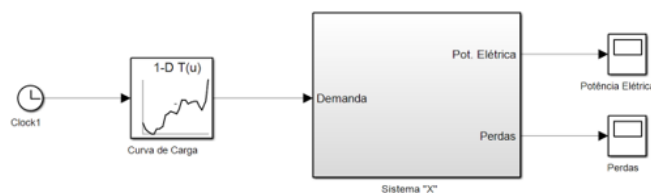


Fig. 4 Modelo computacional dos sistemas do edifício comercial.

Dentro do subsistema “Sistema X” disposto na Fig. 4, foram criados dois outros subsistemas, denominados “Sistema X em CC” e “Sistema X em CA”, respectivamente. Assim, pode-se realizar a simulação do sistema em corrente contínua ou em corrente alternada. Os subsistemas acima mencionados encontram-se na Fig. 5.

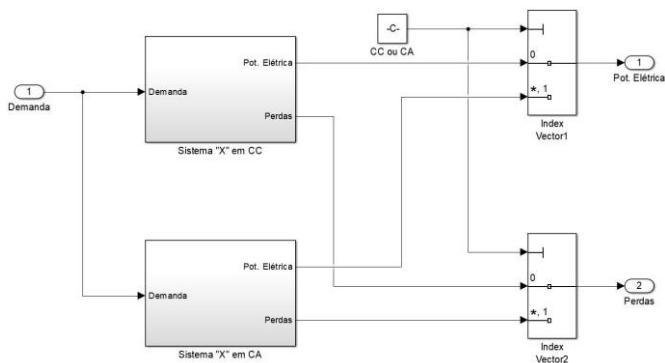


Fig. 5 Subsistemas de “Sistema X”.

Ao escolher realizar a simulação do sistema de distribuição em CC, o modelo realizará os cálculos dispostos no bloco “Sistema X em CC”. Da mesma forma, se o sistema for simulado em CA, o modelo realizará os cálculos dispostos no bloco “Sistema X em CA”. Em ambos os casos o bloco fornece como saída a potência elétrica necessária para sua alimentação, bem como suas perdas. Os cálculos mencionados serão discriminados nas próximas seções.

### 3.2.1 Sistema de Iluminação e Computadores

Para se conectarem ao sistema de distribuição do edifício comercial, o sistema de iluminação e o de computadores necessitam dos mesmos estágios de conversão de energia elétrica. Dessa forma, os sistemas de refrigeração e computadores foram modelados da mesma maneira.

A potência instalada do sistema de iluminação é de 21,6 kW. Enquanto a potência instalada do sistema de computadores é de 123,9 kW.

A partir das curvas de carga são realizados os procedimentos dispostos em 3.2 e, na condição de simulação do sistema de iluminação ou do sistema de computadores em corrente contínua, é realizado o cálculo da potência elétrica após a conversão CC-CC da seguinte maneira:

$$P_{rede,sistema} = \frac{P_{sistema}}{\eta_{cc/cc}}$$

Onde:

$P_{rede,sistema}$  – Potência necessária para a alimentação do sistema de iluminação ou computadores (kW);

$P_{sistema}$  – Potência do sistema de iluminação ou computadores (kW);

$\eta_{cc/cc}$  – Rendimento do conversor CC-CC (conforme Tabela 1).

Já se o sistema for simulado em corrente alternada, o cálculo da potência elétrica após as conversões CA-CC e CC-CC, é realizado como:

$$P_{rede,sistema} = \frac{P_{sistema}}{\eta_{ca/cc} \times \eta_{cc/cc}}$$

Onde:

$P_{rede,sistema}$  – Potência necessária para a alimentação do sistema de iluminação ou computadores (kW);

$P_{sistema}$  – Potência do sistema de iluminação ou computadores (kW);

$\eta_{ca/cc}$  – Rendimento do conversor CA-CC (conforme Tabela 1);

$\eta_{cc/cc}$  – Rendimento do conversor CC-CC (conforme Tabela 1).

As perdas de ambos os sistemas são calculadas da seguinte forma:

$$P_{perdas,sistema} = P_{rede,sistema} - P_{sistema}$$

Onde:

$P_{perdas,sistema}$  – Perdas relacionadas ao sistema de iluminação ou computadores (kW);

$P_{rede,sistema}$  – Potência necessária para a alimentação do sistema de iluminação ou computadores (kW);

$P_{sistema}$  – Potência do sistema de iluminação ou computadores (kW);

### 3.2.2 Sistema de Refrigeração e Elevador

Como o sistema de refrigeração e o elevador do edifício necessitam dos mesmos estágios de conversão para se conectarem à rede de distribuição da edificação, ambos foram modelados da mesma maneira.

O sistema de refrigeração possui potência instalada de 97,8 kW e o elevador da edificação é de 9,6 kW.

Se o sistema de refrigeração ou o elevador forem simulados em corrente contínua, o cálculo de potência elétrica após a conversão CC-CA corresponde a:

$$P_{rede,sistema} = \frac{P_{sistema}}{\eta_{cc/ca}}$$

Onde:

$P_{rede,sistema}$  – Potência necessária para a alimentação do sistema de refrigeração ou do elevador (kW);

$P_{sistema}$  – Potência do sistema de refrigeração ou do elevador (kW);

$\eta_{cc/ca}$  – Rendimento do conversor CC-CA (conforme Tabela 1).

Se simulado em corrente alternada, o cálculo da potência elétrica do sistema após as conversões CA-CC e CC-CA, se dá por:

$$P_{rede,sistema} = \frac{P_{sistema}}{\eta_{ca/cc} \times \eta_{cc/ca}}$$

Onde:

$P_{rede,sistema}$  – Potência necessária para a alimentação do sistema de refrigeração ou do elevador (kW);

$P_{sistema}$  – Potência do sistema de refrigeração ou do elevador (kW);

$\eta_{ca/cc}$  – Rendimento do conversor CA-CC (conforme Tabela 1);

$\eta_{cc/ca}$  – Rendimento do conversor CC-CA (conforme Tabela 1).

As perdas do sistema de refrigeração e do elevador são definidas por:

$$P_{perdas,sistema} = P_{rede,sistema} - P_{sistema}$$

Onde:

$P_{perdas,sistema}$  – Perdas relacionadas ao sistema de refrigeração ou elevador (kW);

$P_{rede,sistema}$  – Potência necessária para a alimentação do sistema de refrigeração ou elevador (kW);

$P_{sistema}$  – Potência do sistema de refrigeração ou elevador (kW);

### 3.3 Banco de Baterias

A potência instalada do banco de baterias é de 64 kW. Ressalta-se que o banco de baterias do edifício fornece energia ao sistema no período da tarde (14h às 18h) e, das 8h às 12h, consome energia para o seu carregamento. Além disso, o banco de baterias é responsável pela alimentação das cargas no caso do não fornecimento de energia pela concessionária.

O modelo que representa o banco de baterias foi dividido em etapa de carregamento e etapa de descarregamento. Na primeira etapa o sistema fornece energia ao banco para seu carregamento, enquanto na segunda, é o banco de baterias quem fornece energia ao sistema para a alimentação das cargas.

#### 3.3.1 Etapa de Carregamento do Banco de Baterias

Na condição de simulação do sistema em corrente contínua, é realizado o cálculo da potência elétrica após a conversão CC-CC da seguinte maneira:

$$P_{rede,bateria} = \frac{P_{bateria}}{\eta_{cc/cc}}$$

Onde:

$P_{rede,bateria}$  – Potência necessária para o carregamento do banco de baterias (kW);

$P_{bateria}$  – Potência do banco de baterias (kW);

$\eta_{cc/cc}$  – Rendimento do conversor CC-CC (conforme Moia (2016)).

No caso da simulação do sistema em CA, o cálculo da potência elétrica após as conversões CA-CC e CC-CC, é realizado da seguinte forma:

$$P_{rede,bateria} = \frac{P_{bateria}}{\eta_{ca/cc} \times \eta_{cc/cc}}$$

Onde:

$P_{rede,bateria}$  – Potência necessária para o carregamento do banco de baterias (kW);

$P_{bateria}$  – Potência do banco de baterias (kW);

$\eta_{ca/cc}$  – Rendimento do conversor CA-CC (conforme Tabela 1);

$\eta_{cc/cc}$  – Rendimento do conversor CC-CC (conforme Moia (2016)).

As perdas são calculadas da seguinte forma:

$$P_{perdas,bateria} = P_{rede,bateria} - P_{bateria}$$

Onde:

$P_{perdas,bateria}$  – Perdas relacionadas ao banco de baterias (kW);

$P_{rede,bateria}$  – Potência necessária para o carregamento do banco de baterias (kW);

$P_{bateria}$  – Potência do banco de baterias (kW).

#### 3.3.2 Etapa de Descarregamento do Banco de Baterias

O caso de descarregamento do banco de baterias funciona de maneira similar a etapa de carregamento da bateria. Porém, quando o modelo está realizando a simulação em corrente contínua, o cálculo da potência elétrica é efetuado conforme segue:

$$P_{rede,bateria} = P_{bateria} \times \eta_{cc/cc}$$

Onde:

$P_{rede,bateria}$  – Potência injetada na instalação elétrica proveniente do banco de baterias (kW);

$P_{bateria}$  – Potência do banco de baterias (kW);

$\eta_{cc/cc}$  – Rendimento do conversor CC-CC (conforme Moia (2016)).

Quando é feita a simulação em corrente alternada, o cálculo da potência elétrica injetada na instalação é realizado da seguinte forma:

$$P_{rede,bateria} = P_{bateria} \times \eta_{cc/cc} \times \eta_{cc/ca}$$

Onde:

$P_{rede,bateria}$  – Potência injetada na instalação elétrica proveniente do banco de baterias (kW);

$P_{bateria}$  – Potência do banco de baterias (kW);

$\eta_{cc/cc}$  – Rendimento do conversor CC-CC (conforme Moia (2016));

$\eta_{cc/ca}$  – Rendimento do conversor CC-CA (conforme Tabela 1).

As perdas são calculadas da seguinte forma:

$$P_{perdas,bateria} = P_{bateria} - P_{rede,bateria}$$

Onde:

$P_{perdas,bateria}$  – Perdas relacionadas ao banco de baterias (kW);

$P_{bateria}$  – Potência do banco de baterias (kW);

$P_{rede,bateria}$  – Potência injetada na instalação elétrica pelo banco de baterias (kW).

### 3.4 Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico (FV) do edifício conta com 380 módulos fotovoltaicos de 270 W, totalizando 102,60 kW de potência instalada para geração de energia elétrica. No sistema fotovoltaico do edifício foram utilizados 4 (quatro) inversores fotovoltaicos de 25 kW cada, totalizando uma potência total de 100 kW.

Na condição de simulação do sistema fotovoltaico em corrente alternada, o sistema mostra a potência injetada na rede e as perdas no inversor conforme curvas obtidas através da simulação da planta FV no software PVsyst (PVsyst, s.d.).

Se o sistema fotovoltaico for simulado em corrente contínua, o cálculo da potência elétrica gerada e das perdas é realizado da seguinte forma:

$$P_{rede,FV} = (P_{FV} + P_{inv}) \times \eta_{cc/cc}$$

Onde:

$P_{rede,FV}$  – Potência injetada na instalação elétrica em CC pelo sistema FV (kW);

$P_{FV}$  – Potência injetada na instalação elétrica em CA pelo sistema FV (kW);

$P_{inv}$  – Perdas nos inversores (kW);

$\eta_{cc/cc}$  – Rendimento do conversor CC-CC.

Para a eficiência do conversor CC/CC utilizado no sistema FV, estipulou-se um rendimento médio de 98%, de acordo com os rendimentos elencados pelo PVsyst para o sistema em CA.

$$P_{perdas,FV} = (P_{FV} + P_{inv}) - P_{rede,FV}$$

Onde:

$P_{perdas,FV}$  – Perdas do sistema FV (kW);

$P_{FV}$  – Potência injetada na instalação elétrica em CA pelo sistema FV (kW);

$P_{inv}$  – Perdas nos inversores (kW);

$P_{rede,FV}$  – Potência injetada na instalação elétrica em CC pelo sistema FV (kW).

### 3.5 Retificador Bidirecional

O retificador bidirecional presente no sistema de distribuição de energia em CC é o elemento responsável pela interface entre a rede primária da concessionária de energia elétrica e a rede de distribuição do edifício em corrente contínua.

Quando a microrrede é simulada em CA, o sistema do retificador bidirecional não é utilizado, isto é, a potência a montante do retificador equivale a potência que sai do mesmo.

Ao simular-se a microrrede em CC o modelo divide os valores de potência pela curva de eficiência do retificador bidirecional, a qual varia de acordo com a potência processada pelo equipamento conforme o cálculo abaixo.

$$P_{rede,retif} = \frac{P_{sistema\_cc}}{\eta_{retif}}$$

Onde:

$P_{rede,retif}$  – Potência necessária para alimentar o sistema em CC (kW);

$P_{sistema\_cc}$  – Potência total do sistema em CC (kW);

$\eta_{retif}$  – Curva de rendimento do retificador (valores adotados entre 95% e 98% conforme Tabela 1).

O cálculo das perdas no retificador é realizado da seguinte forma:

$$P_{perdas,retif} = P_{rede,retif} - P_{sistema\_cc}$$

Onde:

$P_{perdas,retif}$  – Perdas relacionadas ao retificador (kW);

$P_{rede,retif}$  – Potência necessária para alimentar o sistema em CC (kW);

$P_{sistema\_cc}$  – Potência total do sistema em CC (kW).

### 3.6 Transformador

A análise de eficiência energética no transformador deu-se pelo cálculo de suas perdas de acordo com a potência processada pelo equipamento. O cálculo das perdas no transformador foi realizado de acordo com as premissas dispostas nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) em seu

Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2018).

Assim, escolheu-se um transformador a óleo de distribuição de 500 kVA, da fabricante WEG, o qual possui valores de perda em vazio igual a 1,0 kW e perda total de 9,3 kW (WEG, 2008-2020).

#### 4. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO EDIFÍCIO

Nesta seção são apresentados os resultados da comparação das perdas e eficiência energética da simulação do sistema de distribuição do edifício em corrente contínua e em corrente alternada.

##### 4.1 Demanda de Energia Elétrica

Para o período de um ano, o sistema em corrente contínua exigiu menos energia da rede elétrica quando comparado ao sistema em corrente alternada. Nesse período o edifício alimentado pelo sistema de distribuição em CA demandou 113.914,81 kWh a mais do que o sistema de distribuição em CC.

A carga quando alimentada pelo sistema em corrente contínua consumiu 165.374,92 kWh a menos que o sistema em CA durante o ano. Além disso, na Tabela 2 foram elencadas as diferenças de consumo entre dias úteis, sábados e domingos.

**Tabela 2. Diferença do consumo diário da carga (kWh)**

	Sistema em CC (kWh)	Sistema em CA (kWh)	Diferença (kWh)
Dias Úteis	4.950,36	5.458,87	508,51
Sábados	3.652,95	4.029,03	376,08
Domingos	2.435,81	2.687,65	251,84

##### 4.2 Fontes de Geração de Energia

Em se tratando de geração fotovoltaica, o sistema em corrente contínua apresentou uma eficiência maior, fato que culminou em um maior índice de energia elétrica injetada na instalação frente ao sistema em corrente alternada. Entre os sistemas de distribuição em CC e em CA, o primeiro superou o sistema tradicional em 203,90 kWh.

Pela análise dos resultados das simulações, conclui-se que a carga consumiu mais energia quando alimentada em corrente alternada e, que o edifício em sua totalidade demandou mais energia da rede elétrica também quando alimentado em CA. Ainda, o sistema fotovoltaico obteve índices de geração maiores quando conectado ao sistema de distribuição em corrente contínua.

##### 4.3 Perdas de Energia Elétrica

As perdas relacionadas a geração fotovoltaica foram de aproximadamente 203,90 kWh a menos na distribuição em corrente contínua do que em corrente alternada.

O transformador do edifício comercial apresentou 1.618,69 kWh a menos de perdas de energia anuais ao alimentar o edifício com distribuição em corrente contínua.

A Tabela 3 exibe um comparativo das diferenças de perdas anuais de energia elétrica do edifício com distribuição de energia em corrente contínua ou em corrente alternada. O comparativo também é ilustrado na Fig. 6.

**Tabela 3. Comparativo de perdas anuais.**

SISTEMA	CC (kWh)	CA (kWh)	Diferença (kWh)
Iluminação	5275,80	24984,25	19708,45
Computadores	63156,69	150874,31	87717,62
Refrigeração	30173,88	75596,92	45423,04
Elevador	2961,85	11813,37	8851,52
Banco de Baterias	2397,47	7181,36	4783,89
Sistema FV	4397,02	4600,92	203,90
Transformador	18645,52	20264,21	1618,69
Retificador Bidirecional	54392,31	-	-
Total	181400,55	295315,35	113914,81



Fig. 6 Diferença de perdas de energia entre os sistemas de distribuição.

Através desse comparativo, verifica-se que a concentração do estágio de conversão CA-CC em um conversor de grande porte, para alimentar o tipo de carga proposto para o edifício, leva a menores perdas de energia e maiores índices de eficiência do sistema de distribuição. E, conseqüentemente, o ganho em economia de energia do sistema operando em CC quando comparado ao sistema em CA.

Ainda, elaborou-se um quadro comparativo da energia anual demandada da rede elétrica e das perdas totais do sistema no mesmo ano, conforme descrito na Tabela 4.

**Tabela 4. Comparativo entre os sistemas de distribuição.**

	Sistema CC	Sistema CA	Diferença
Energia Elétrica Demandada da Rede (kWh)	1.444.049,7	1.557.964,5	113.914,8
Perdas Totais do Sistema (kWh)	181.400,6	295.315,4	113.914,8
Energia Anual Perdida (%)	12,6	18,9	6,4

O sistema em corrente contínua perdeu 6,4 % a menos da energia demanda da rede em relação ao sistema em CA. Ressalta-se ainda que o sistema de distribuição em CC contribui com a diminuição de componentes harmônicos de corrente injetados na rede elétrica advindos das cargas eletrônicas, já que, o retificador de interface garante alto fator de potência no ponto de conexão com a rede convencional.

Considerando a tarifa de energia elétrica do edifício como horo-sazonal verde e calculando-se sua fatura de energia elétrica, tomando como base o mês de dezembro, têm-se que quando utilizado um sistema em CC no edifício, sua fatura de energia elétrica diminui cerca de R\$ 5.303,08. Logo, no horizonte de um ano, tomando como base o mês de dezembro, a instalação em CC economizaria cerca de R\$ 63.636,93 frente ao sistema em CA.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto a utilização de um sistema de distribuição em corrente contínua em um edifício comercial localizado na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. O edifício utilizado como estudo de caso possui um grande número de cargas eletrônicas, que estão distribuídas no sistema de iluminação, computadores, elevador e refrigeração. Como geração de energia elétrica, um sistema fotovoltaico é conectado ao edifício, fornecendo alimentação às cargas. Como armazenamento de energia, o edifício possui um banco de baterias, responsável por alimentar o sistema no caso de não fornecimento de energia pela rede elétrica da concessionária.

O sistema de distribuição de energia em corrente contínua proposto para o edifício comercial possui um barramento bipolar de  $\pm 185$  V, devido ao fato de neste nível de tensão os equipamentos do edifício poderem ser utilizados normalmente. O sistema de distribuição em corrente contínua apresentou melhora frente ao sistema em corrente alternada, com diminuição da energia demandada pelas cargas e das perdas de energia elétrica anuais, fato que culminou no aumento da eficiência do edifício. Ainda, devido ao retificador bidirecional presente no sistema em CC, a rede de energia elétrica enxerga o edifício como uma carga com fator de potência unitário, fato que leva a diminuição da injeção de harmônicos na rede e consequente melhoria na qualidade e eficiência energética.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2018). *PRODIST - Módulo 7*. [Online] Available at: [https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo7\\_Revisao\\_5+-+Retificado/669bf2b6-7fb4-07e8-f5fd-0bea4d83ad34](https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo7_Revisao_5+-+Retificado/669bf2b6-7fb4-07e8-f5fd-0bea4d83ad34) [Acesso em 17 Agosto 2019].
- Elsayed, A. T., Mohamed, A. A. and Mohammed, O. A. (2015). DC microgrids and distribution systems: An overview. *Electric Power Systems Research*, pp. 407-417.
- Liu, Z. and Li, M. (2014). Research on Efficiency of DC Distribution System. *AASRI Procedia* 7, pp. 68-74.
- MathWorks, 1994-2020. MATLAB. [Online] Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [Acesso em 30 Maio 2020].
- Moia, J. (2016). Sistema de conversão estática CA-CC bidirecional aplicado à microrredes CC bipolares, Florianópolis: UFSC.
- Prabhala, V. A., Baddipadiga, B. P., Fajri, P. and Ferdowsi, M. (2018). An Overview of Direct Current Distribution System Architectures & Benefits. *Energies - Open Access Journal*, Setembro, pp. 7-12.
- PVsystem, s.d. PVsystem Photovoltaic Software. [Online] Available at: <https://www.pvsystem.com/> [Acesso em 30 Maio 2020].
- Reed, G. F. (2012). DC technologies: solutions to electric power system advancements. *IEEE Power Energy Magazine*, Outubro, pp. 10-17.
- Seo, G. et al. (2011). Modeling and Analysis of DC Distribution Systems. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, Junho, pp. 223-227.
- WEG (2008-2020). *Transformadores*. [Online] Available at: [http://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_transf\\_dimens.asp](http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_transf_dimens.asp) [Acesso em 26 Outubro 2019].
- Wu, T. et al. (2013). DC-Bus Voltage Control With a Three-Phase Bidirectional Inverter for DC Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Abril, pp. 1890-1899.