

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Giuseppe Franco Kühn Calcavecchia

Análise Técnico - Financeira da Inserção de Baterias Em Uma Usina Híbrida de Geração de Energia Fotovoltaica e Térmica

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Sergio Braga

Rio de Janeiro
Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o carinho e suporte que me deram até hoje sem ela essa conquista não seria possível.

Agradeço à Puc por ter sido parte importante da minha formação não só como profissional como ser humano.

Agradeço à universidade de Lund por me propiciar um intercâmbio acadêmico excelente e me introduzir à geração de energias renováveis.

Agradeço a Voltalia por ter aberto as portas para mim, e por me proporcionar uma inigualável experiência de trabalho. Além do compartilhamento de informações e de muito conhecimento para esse trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Análise Técnico - Financeira da Inserção de Baterias Em Uma Usina Híbrida de Geração de Energia Fotovoltaica e Térmica

Trabalho técnico-financeiro que propõe um método de armazenamento de energia em usinas híbridas, dentro do sistema isolado. O estudo leva em consideração a expansão da usina fotovoltaica para possibilitar a produção instantânea excedente, e permitir o armazenamento de energia nas baterias. Com essa energia armazenada é possível reduzir o consumo de diesel da usina térmica e conseqüentemente reduzir os custos de operação, além de reduzir as emissões de gases poluentes. O projeto discute se o investimento nas baterias é viável tecnicamente e economicamente, levando em consideração as especificações das baterias, assim como as variáveis econômicas do projeto, de forma a explicitar se vale a pena realizar o investimento em baterias no presente momento.

Palavras chaves: Usina híbrida. Sistema isolado. Usina fotovoltaica. Geração à Diesel. Armazenamento de energia. Bateria íon de lítio.

ABSTRACT

Technical – Financial Analysis of Battery's Implementation In A Hybrid Power Generation Plant

Technical-financial work that offers a design of energy storage in a hybrid power plant on off-grid system. The study considers the expansion of a photovoltaic power plant enabling instantaneous overproduction which can be stored this energy in the batteries. This stored energy can reduce diesel consumption on the thermal power plant and thereby reduce its operating costs, as well reducing emissions of polluting gases. The project discusses whether the investment in batteries is technically and economically viable, considering battery specifications and economic features of the project. The study aims to define the interest in investing in batteries for isolated PV plant today.

Key-words: Hybrid Power plant, Microgrid, PV plant, thermal power plant, Energy storage, Li-ion battery

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivo do TCC | 1 |
| 1.2 Motivação | 1 |
| 1.3 Contextualização | 2 |
| 2. Revisão bibliográfica | 3 |
| 2.1 Produção de Energia Solar Fotovoltaica | 3 |
| 2.2 Usina geradora térmica | 5 |
| 2.3 Baterias | 7 |
| 2.3.1 Comparação entre as tecnologias de baterias | 7 |
| 3. Apresentação do projeto | 12 |
| 3.1 UTE Oiapoque | 13 |
| 3.2 UFV - Oiapoque | 13 |
| 3.2.1 Equipamentos UFV | 15 |
| 3.3 Expansão do Projeto | 16 |
| 3.3.1 Novos Equipamentos | 16 |
| 3.3.2 Escolha da Bateria | 18 |
| 4. Modelo matemático | 19 |
| 4.1 Dimensionamento das baterias: | 19 |
| 4.2 Balanço energético | 21 |
| 4.3 Análise financeira | 26 |
| 5. Explicação dos cenários | 28 |
| 6. Resultados | 31 |
| 6.1 Análise preliminar | 31 |
| 6.2 Cenário 3 | 35 |
| 6.3 Cenário 4 | 40 |
| 6.4 Cenário 5 | 45 |
| 6.5 Comparação entre os cenários | 51 |
| 6.6 Proposta de melhorias | 53 |
| 7. Conclusão | 55 |
| 7.1 Próximos passos | 56 |
| 8. Referências | 57 |
| Anexo A – Manual técnico BYD | 59 |

| | |
|--|----|
| Anexo B – Manual Técnico Schneider | 60 |
| Anexo C - Manual Técnico Longi | 61 |
| Anexo D – Manual técnico Sungrow | 62 |
| Anexo E – Manual técnico Saft | 63 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Sistema Interligado Nacional (INPE, 2017) | 2 |
| Figura 2 Corte transversal de uma célula fotovoltaica (CRESESB, 2006) | 4 |
| Figura 3 Variação da Irradiação (SOLAR BRASIL, 2014) | 4 |
| Figura 4 Consumo específico Usina termelétrica (ANEEL, 2008) | 6 |
| Figura 5 Campos de atuação para as Bateria (IRENA, 2019)..... | 7 |
| Figura 6 Tecnologias de Baterias (ESWF, 2019) | 8 |
| Figura 7 Preço das baterias (IRENA, 2019) | 9 |
| Figura 8 Comparação técnica baterias (NRECA, COBANK, NRTC, NRUCFC, 2019)..... | 9 |
| Figura 9 Vida útil em Ciclos Bateria de Lítio (SAFT, 2014) | 10 |
| Figura 10 Aumento da Capacidade de Armazenamento (IRENA, 2019) | 11 |
| Figura 11 Configuração Proposta para a Usina (SAGE, 2019) | 11 |
| Figura 12 Imagem de Satélite (Google Earth, 2019) | 13 |
| Figura 13 Atlas brasileiro de energia solar (INPE, 2006) | 14 |
| Figura 14 Layout UFV Oiapoque (VOLTALIA, 2017) | 15 |
| Figura 15 Manual técnico Saft (Anexo 5) | 18 |
| Figura 16 Manual Técnico Saft (ANEXO E) | 19 |
| Figura 17 Resenha Mensal (EPE, 2019)..... | 29 |
| Figura 18 Previsão do Custo do Diesel Amapa para 2020 (EPE, 2019) | 30 |
| Figura 19 Produção dia médio – Cenário atual | 31 |
| Figura 20 Número de dias com chuva Macapá (Artigo) | 32 |
| Figura 21 Produção Melhor e Pior dia (Autor) | 35 |
| Figura 22 Geração de Energia Para Média do 1º ano – Cenário 3 (autor)..... | 39 |
| Figura 23 Fluxo de Caixa – Cenário 3 (autor) | 40 |
| Figura 24 Geração de Energia Para Média do 1º ano – Cenário 4 (autor) | 44 |
| Figura 25 Fluxo de Caixa - Cenário 4 (autor) | 45 |
| Figura 27 Geração De Energia Média 1º Ano - Cenário 5 (Autor)..... | 50 |
| Figura 28 Fluxo de Caixa – Cenário 5 (Autor)..... | 51 |
| Figura 29 Comparação redução causada pelas baterias (Autor) | 52 |
| Figura 30 Comparativo da Redução de Emissões | 52 |
| Figura 31 Fluxo de Caixa R\$ 4,15 - Cenário 4 | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 Fluxo de Caixa atraso de 1 ano - Cenário 4..... | 55 |
|---|----|

Lista de tabelas

| | |
|---|--------------------------------------|
| Tabela 1 Comparação Baterias..... | Erro! Indicador não definido. |
| Tabela 2 Comparação entre UFVs (Autor)..... | 17 |
| Tabela 3 Comparação de Produção UFV | 18 |
| Tabela 4 Produção ao Longo do ano | 32 |
| Tabela 5 Piores Dias do Ano..... | 33 |
| Tabela 6 Melhores Dias do Ano | 34 |
| Tabela 8 Potência Cenário 3..... | 35 |
| Tabela 9 Dimensionamento da bateria – Cenário 3 (Autor) | 36 |
| Tabela 10 Variação da bateria - Cenário 3..... | 37 |
| Tabela 11 Análise Global - Cenário 3 (Autor)..... | 38 |
| Tabela 12 Elaboração dos Custos - Cenário 3 (Autor)..... | 39 |
| Tabela 13 Potência Cenário 4 (Autor)..... | 41 |
| Tabela 14 Dimensionamento da bateria - Cenário 4 | 41 |
| Tabela 15 Duração da bateria - Cenário 4 | 42 |
| Tabela 16 Análise global do projeto - Cenário 4..... | 43 |
| Tabela 17 Elaboração dos Custos Cenário 4 | 44 |
| Tabela 18 Potência instalada - Cenário 5 (Autor)..... | 46 |
| Tabela 19 Dimensionamento Bateria - Cenário 5 (Autor)..... | 46 |
| Tabela 20 Degradação da Bateria - Cenário 5 (Autor)..... | 48 |
| Tabela 21 Análise global - Cenário 5 (Autor)..... | 49 |
| Tabela 22 Elaboração dos custos - Cenário 5..... | 50 |
| Tabela 23 Redução Ao Longo do Projeto (Autor)..... | 53 |

Lista de Acrônimos

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

C_{apex} – Custo do investimento inicial (R\$).

C_{Bat} – Custo da bateria (R\$/MWh).

CC – Custo de capital (%)

CCC – Conta Consumo de Combustíveis

CEA – Companhia Elétrica do Amapá

C_{Dieel} – Preço do Litro do óleo diesel (R\$).

C_i – Custo do investimento durante o projeto (R\$).

C_{opex} – Custos de manutenção (R\$).

C_{serv} – Custo dos serviços de montagem (R\$/MWh).

D_i – Demanda da cidade (UFV + UTE) medida pelo sistema (kWh).

D_{sc} – Demanda da cidade (kWh).

$E_{armazenada}$ – Energia realmente armazenada na bateria (kWh).

$E_{bateriareal}$ – Energia disponível na bateria para armazenamento (kWh).

$\overline{E_{EXC}}$ – Média da produção excedente da UFV de um dia médio. (kWh).

E_{EXCCA} – Energia produzida em excesso pela UFV em corrente alternada (kWh).

E_{EXCCC} – Energia produzida em excesso pela UFV em corrente contínua (kWh).

$E_{EXCMáx}$ – Produção excedente máxima (kWh).

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

E_{pvBYD} – Energia simulada pelo software PVsyst com a configuração da UFV em operação (kWh).

$E_{pvLongi}$ – Energia simulada pelo software PVsyst com a configuração de uma nova UFV em operação (kWh).

E_{UFVi} – Energia produzida pela UFV (kWh).

E_{UFVSC} – Energia produzida pela UFV medida pelo sistema de controle de dados (kWh).

E_{UTEi} – Energia produzida pela UTE (kWh).

$E_{UTEmín}$ – Energia mínima produzida pela UTE (kWh).

F – Fator de correção entre simulações e medições.

H – Horas do dia médio a produção excedente da UFV ocorre (horas).

i – Anos [0;24].

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

I_{ef} – Eficiência dos inversores de frequência (%).

I – Inflação (%).

L_{Diesel} – Litros de diesel economizados pela bateria (litros).

P – Potência da bateria (kW).

Payback – Tempo de retorno do investimento inicial (anos).

PPA – Private purchase agreement – Contrato de venda de energia

P_{real} – Potência da bateria implementada (kW).

Q – Capacidade de armazenamento da bateria (kWh).

Q_{real} – Capacidade de armazenamento considerando as perdas (kWh).

R – Redução no consumo de litros de diesel (L).

RT_{ef} – Eficiência carga/descarga da bateria (%).

S – Saldo (R\$).

S_{oc} – Estado inicial de carga - State of charge (%).

TIR – Taxa de retorno de investimento (%).

VPL – Valor presente líquido (R\$).

x – Aumento % do consumo da cidade (%).

α – Degradação anual do módulo fotovoltaico Longi (%).

β – Degradação anual da bateria (%).

φ – Degradação anual do módulo fotovoltaico BYD (%).

ρ – Consumo específico de Diesel (L/MWh).

1. Introdução

1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é analisar se a implementação de um sistema de armazenamento de energia faria sentido técnica e economicamente na usina híbrida do Oiapoque, já em operação. Caso o estudo não possua um resultado positivo, serão analisados em quais condições a implementação de baterias seriam viáveis.

Outra linha de estudo do trabalho proposto será o impacto ambiental que as baterias poderiam causar na cidade do Oiapoque. Para mensurar tal impacto seria necessário medir a quantidade de kg de CO_2 que deixaria de ser emitida na atmosfera devido à implementação das baterias.

1.2 Motivação

Esse trabalho de conclusão de curso possui 3 distintas motivações: financeira, técnica e ambiental.

A motivação financeira deriva do desejo de propor um novo modelo de geração de energia que seja rentável e dessa forma ser atrativo para investidores. Dessa forma seria analisado se já é viável financeiramente e se não for quão longe está de viabilizar projetos de armazenamento de energia com a utilização de baterias.

A motivação técnica é saber se a utilização da bateria em conjunto com as usinas geradora à diesel e fotovoltaica realmente funciona na prática. Ou seja, verificar se o sistema ainda é capaz de suprir a quantidade de energia demandada pela cidade com a implementação das baterias. Uma vez validada a metodologia desse estudo de caso, seria estudada a possibilidade de implementação de uma ferramenta semelhante para auxiliar na análise de projetos híbridos para a própria empresa Voltalia, detentora do projeto do Oiapoque.

A motivação ambiental é vinculada ao desejo de reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera devido à produção de energia elétrica. Dessa forma parte da população local seria beneficiada com a melhoria na qualidade do ar.

1.3 Contextualização

Na região Amazônica, grande parte da região não está conectada ao sistema interligado de distribuição de eletricidade do Brasil. Produtores independentes e/ou fornecedoras de energia estatais são responsáveis por operar centenas de pequenas redes que suprem a maior parte demanda dessa região. O montante de energia gerada corresponde à uma parcela muito pequena, próxima à 1% do consumo total de energia do país. Esses sistemas mencionados acima, compõem o sistema isolado brasileiro (ISOL), que está desconectada do sistema interligado nacional (SIN). (INPE, 2006)

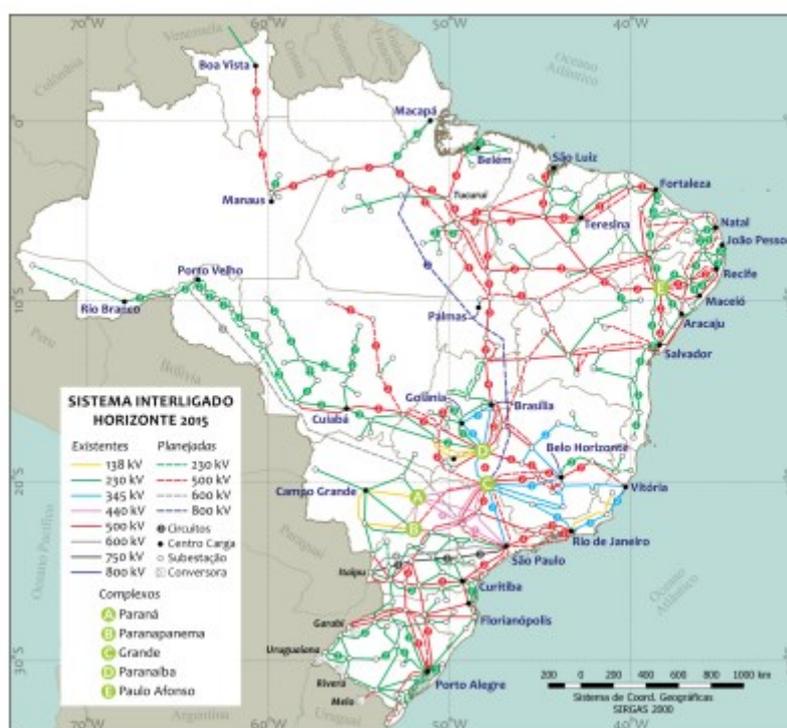


Figura 1 - Sistema Interligado Nacional (INPE, 2017)

Em sua maioria, os Sistemas Isolados brasileiros (ISOL) estão espalhados na região Norte do Brasil. São responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica aos estados do Acre, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Amapá e Mato Grosso, bem como à ilha de Fernando de Noronha. (WILKE, SILVA LORA e VENTURINI, 2018)

No sistema isolado, as centrais termelétricas possuem direito ao subsídio da conta consumo de combustível. Esse subsídio se justifica uma vez que o custo da energia nos sistemas isolados é muito dependente do custo do óleo diesel, e ele possui um valor

elevado nessas localidades, (INESC, 2018). Grande parte dessas usinas apresentam restrições de acesso dificultando a logística de abastecimento de combustível e manutenção devido às grandes distâncias dos centros de abastecimento e falta de estradas e ruas pavimentadas, no meio da floresta amazônica. (INPE, 2006) Somente no Brasil, os sistemas isolados possuem em torno de 230 usinas termelétricas com um consumo diesel de 1,08 bilhões de litros/ano. (WILKE, SILVA LORA e VENTURINI, 2018)

Atualmente, vive-se em um contexto no qual a expansão da geração de energias renováveis está se tornando realidade. Parte dessa expansão deriva da necessidade de se atender as exigências globais referentes à redução do consumo de combustíveis fósseis, o que reduziria a emissão de gases do efeito estufa (EPE, 2018). Outro fator que potencializa essa transição energética é a queda abrupta no preço dos equipamentos. O módulo fotovoltaico sofreu uma redução de 80% em seu preço desde 2009, enquanto que as turbinas eólicas reduziram seu preço entre 30 e 40%. (IRENA, 2019).

Outro mercado que tem crescido consideravelmente nos últimos anos é o de armazenamento de energia, principalmente com a utilização das baterias. Esse crescimento é favorecido com a expansão das renováveis, uma vez que a bateria pode ser uma solução para mitigar a intermitência dessas fontes. Vale ressaltar que esse equipamento também sofreu uma queda de preços nos últimos anos. (IRENA, 2019)

Dentro desse contexto, e com uma usina termelétrica já em operação no Oiapoque, dentro do sistema isolado, a Voltalia Energia do Brasil decidiu investir em 2017 para diversificar a fonte de energia da cidade do Oiapoque. A implementação da usina fotovoltaica tornou a cidade do Oiapoque um pouco menos dependente dos combustíveis fósseis e gerou economia devido à redução dos custos de operação da usina, em virtude da redução no consumo de diesel. (VOLTALIA, 2017)

Com o intuito de reduzir ainda mais o consumo de óleo diesel, o trabalho de conclusão de curso propõe a expansão da usina fotovoltaica do Oiapoque com a implementação conjunta de baterias para maior aproveitamento da produção fotovoltaica.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Produção de Energia Solar Fotovoltaica

Um sistema fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas, que possuem material semicondutor capaz de converter a radiação solar em energia elétrica. A

conversão de energia luminosa em elétrica ocorre a partir do efeito fotovoltaico, por meio do fluxo de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Dessa forma, a partir da conexão de dois eletrodos, uma corrente elétrica é formada e a partir dela e da tensão a energia é gerada.

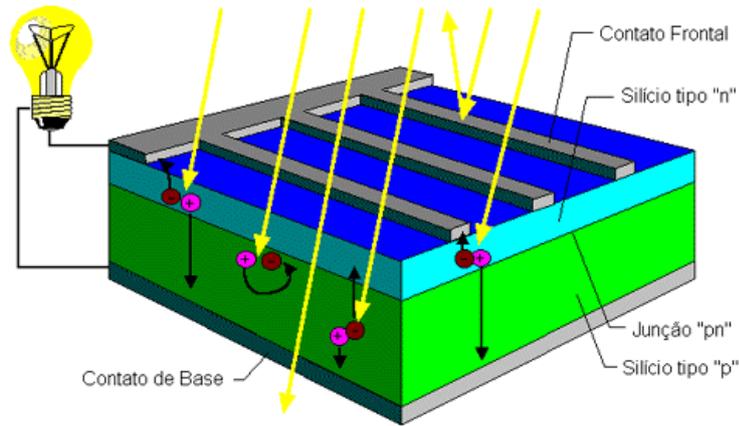


Figura 2 Corte transversal de uma célula fotovoltaica (CRESESB, 2006)

A energia elétrica gerada pelas usinas fotovoltaicas tem como uma de suas características o comportamento intermitente de geração devido a principalmente fatores como variações meteorológicas e o ciclo natural dia/noite. (ALENCAR, RAFAEL e URBANETZ, 2018). A figura 3 ilustra a variação da irradiância com

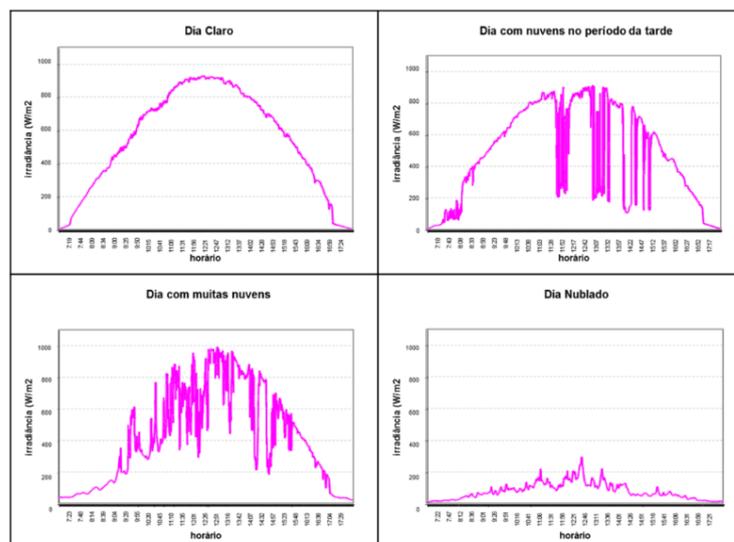


Figura 3 Variação da Irradiação (SOLAR BRASIL, 2014)

Com o objetivo de atender a demanda crescente de energia de uma forma sustentável, surge a preocupação de garantir a confiabilidade, segurança e destas fontes intermitentes. Uma solução para aumentar a confiabilidade do sistema é a integração com fontes complementares de geração de energia (ALENCAR, RAFAEL e URBANETZ, 2018; EPE, 2019).

Para mensurar a energia produzida por parte das usinas fotovoltaicas é comum a utilização de softwares que realizam simulações da produção de energia. No projeto estudado considera-se a utilização do software PVsyst para desempenhar tal função.

No próprio software é possível dimensionar potência, área do sistema, assim como inserir os arquivos dos equipamentos com suas especificações técnicas já definidas pelos fabricantes. Após a definição dos equipamentos utiliza-se um arquivo com os dados meteorológicos do site contendo os dados solarimétricos e de acordo com as coordenadas geográficas do local é possível quantificar a produção de energia, assim como as perdas de todos os componentes da UFV (LEMOS, 2017).

Por meio da simulação e da geração do relatório de resultados que calcula a energia ao longo do primeiro ano de produção de energia tem-se como principais resultados:

- a) Produção total de energia em MWh para o primeiro ano de operação da usina fotovoltaica, parâmetro principal a ser simulado;
- b) O Performance ratio, fator que descreve a qualidade do sistema
- c) A produção específica kWh/kWp, que quantifica a produção energética em relação à potência de módulos instalada;
- d) Principais ganhos e perdas do sistema envolvidas na simulação

Com a utilização do PVsyst pode se dimensionar uma usina fotovoltaica de forma otimizada a fim de moldar a sua necessidade de produção em função das suas definições de projeto. Considerando a maioria das premissas que podem impactar na geração de energia (LEMOS, 2017).

2.2 Usina geradora térmica

As usinas geradoras térmicas possuem um papel muito importante na matriz de energia elétrica. Essas usinas são capazes de injetar a energia de

forma contínua e com um fornecimento ininterrupto se necessário, dependente apenas da quantidade de combustível em estoque disponível. Em contrapartida para produzir a energia a usina emite uma quantidade significativa de gases poluentes, devido à combustão do diesel. (EDUCA MAIS BRASIL, 2017)

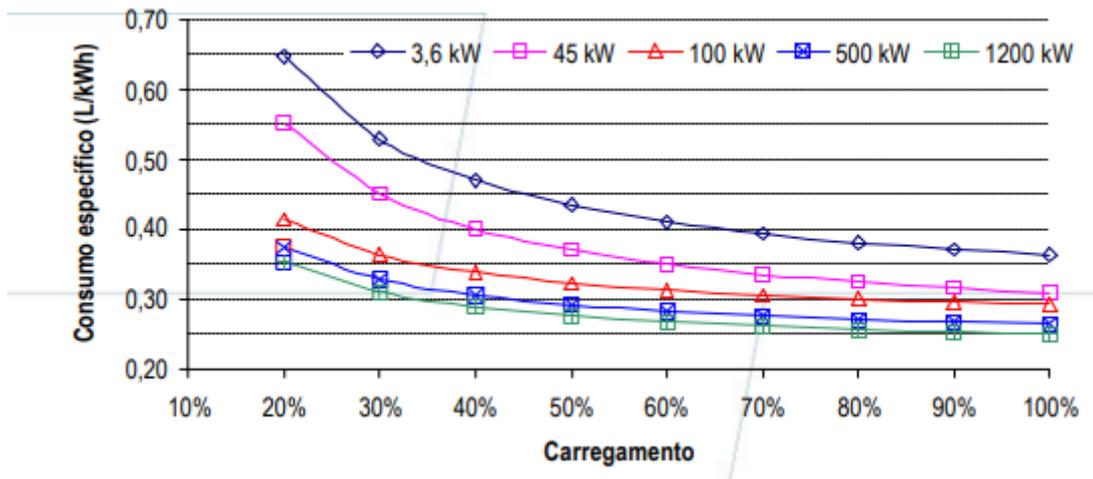


Figura 4 Consumo específico Usina termelétrica (ANEEL, 2008)

Como pode ser visto na figura 4 o consumo específico varia muito em função do carregamento utilizado na máquina geradora à diesel. Caso o carregamento for superior a 50% a máquina possuirá um rendimento muito maior do que se ela estivesse abaixo desse mesmo carregamento. (ANEEL, 2008)

Tabela 1 Tabela Limite de Consumo Específico (ANEEL, 2008)

| Potência (kW) | | Limite de consumo específico (m ³ ou kg ou L/kWh)* | Eficiência média | Combustível** |
|--|--------|--|------------------|---------------|
| de | a | | | |
| <i>Motor de Combustão Interna, UTE até 20.000 kW (por UTE)</i> | | | | |
| 1 | 100 | 0,404 | 24,5% | OD** |
| 101 | 250 | 0,349 | 28,4% | OD** |
| 251 | 500 | 0,329 | 30,1% | OD** |
| 501 | 750 | 0,296 | 33,4% | OD** |
| 751 | 1.000 | 0,289 | 34,3% | OD** |
| 1.001 | 2.500 | 0,283 | 35,0% | OD** |
| 2.501 | 5.000 | 0,267 | 37,1% | OD** |
| 5.001 | 7.500 | 0,266 | 37,2% | OD** |
| 7.501 | 10.000 | 0,259 | 38,2% | OD** |
| 10.001 | 12.500 | 0,253 | 39,1% | OD** |
| 12.501 | 15.000 | 0,253 | 39,1% | OD** |
| 15.001 | 20.000 | 0,253 | 39,1% | OD** |

A tabela 1 define limites de consumo específico para as usinas térmicas com determinadas dimensões. Essa limitação foi estipulada para delimitar até que valor de consumo específico o operador da usina ainda vai ter o direito ao benefício da isenção devido ao CCC. (ANEEL, 2008)

2.3 Baterias

Sistemas de armazenamento de energia com baterias estão sendo cada vez mais usados para ajudar a integrar a produção de energia das fontes renováveis à rede. Eles são capazes de absorver e injetar potência ativa e reativa, em milésimos de segundo. Com esses recursos, as baterias podem atenuar problemas como: a redução da taxa de rampa, ajuste de frequência e problemas de tensão. Além de poder oferecer maior estabilidade para rede. (LEMOS, 2017)

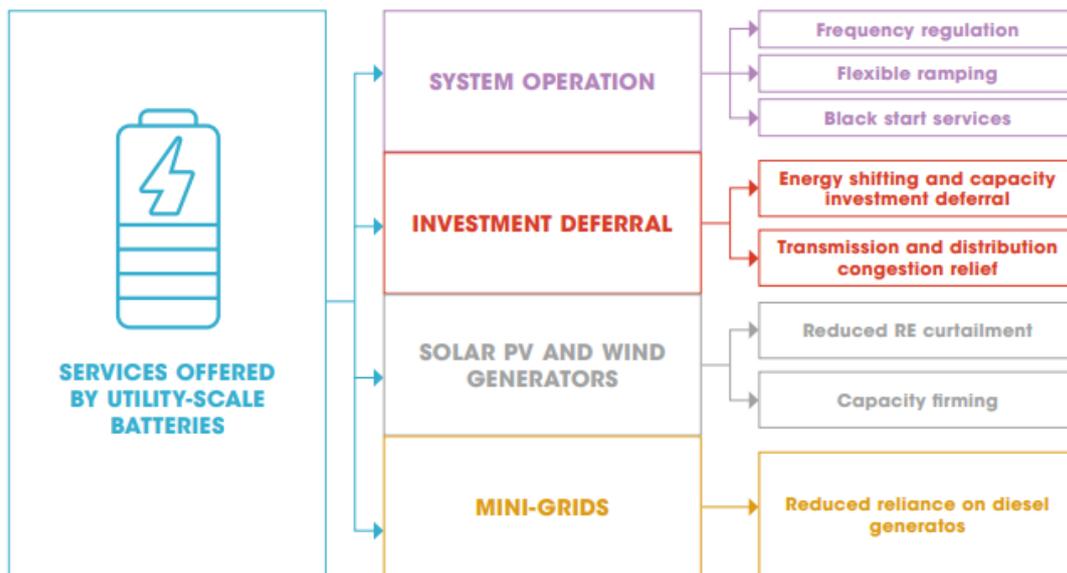


Figura 5 Campos de atuação para as Bateria (IRENA, 2019)

As baterias podem atuar com diversas funções diferentes de acordo com a figura 5. Porém, nesse trabalho de conclusão de curso a utilização proposta para a bateria será a de mini-grid, com o objetivo de reduzir o consumo de diesel ao longo do projeto.

2.3.1 Comparação entre as tecnologias de baterias

No método de avaliação técnica e econômica das baterias, primeiro é preciso fazer uma comparação entre os tipos mais comuns de baterias, e suas vantagens e desvantagens de acordo com premissas estabelecidas para o projeto. As baterias usadas nesse trabalho são as baterias do tipo estacionária. Baterias estacionárias apresentam um ciclo profundo de carga, e fornecem corrente moderada em um período maior de tempo se comparado com baterias de ciclo raso, exemplo das automotivas. (LEMOS, 2017)

| Type | Maturity | Efficiency | Benefits | Challenges |
|---------------------|------------------------------|-------------------|---|--|
| <i>Lead acid</i> | Deployed | 50-90% | - Established - Inexpensive | - Low energy and power density - Depth of discharge |
| <i>Li-ion</i> | Deployed and demonstration | 75-90% | - Good energy and power density | - Cycle life constraints - Safety concerns |
| <i>Sodium</i> | Deployed, continued R&D | 85-90% | - Good energy density | - High temperature required - Limited power |
| <i>Flow battery</i> | Demonstration, continued R&D | 60-80% | - Decoupled power and energy - Improved cycle life | - Low energy density |

Figura 6 Tecnologias de Baterias (ESWF, 2019)

Para a escolha da bateria alguns parâmetros técnicos e comerciais devem ser levados em consideração para verificar qual bateria se adequa melhor ao projeto, (LEMOS, 2017) as premissas do projeto:

- (a) Custo
- (b) Capacidade de Armazenamento
- (c) Ciclo de Vida
- (d) Maturidade Comercial
- (e) Eficiência
- (f) Potência

Considerando a necessidade do projeto de alto armazenamento de energia, a utilização das baterias de Chumbo que atendem melhor projetos que precisem de muita potência em curtos períodos de tempo, como não se busca tal aplicação essa tecnologia será descartada (ESWF, 2019). Pelo motivo contrário, também não se deve considerar a bateria de Sódio, devido à sua potência limitada (ESWF, 2019). Uma vez que a bateria precisaria ter potência suficiente para carregar e descarregar a energia armazenada do dia inteiro em poucas horas. Dentre as tecnologias consideradas as que poderiam atender à necessidade do projeto de forma satisfatória são a bateria de fluxo e a de íon de lítio.

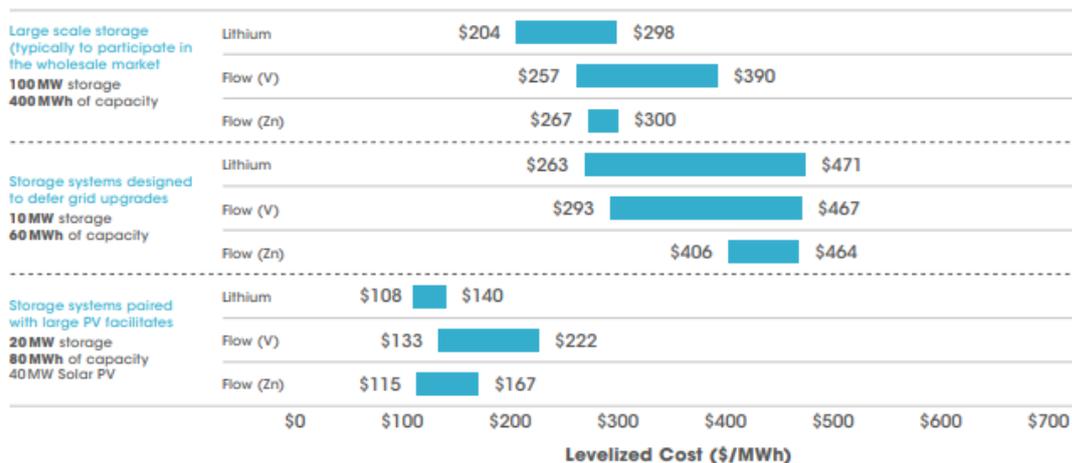


Figura 7 Preço das baterias (IRENA, 2019)

Como pode ser visto na figura 7 a bateria de íon de lítio e a de fluxo possuem preços muito próximos para aplicação em grandes usinas fotovoltaicas. Outros critérios devem ser levados em consideração para essa análise.

| Technology | Typical Duration | Size | Service Life | AC Round trip efficiency | Cycle Life | Advantages | Disadvantages |
|-------------|------------------|---------------|--------------|--------------------------|--|---|-----------------------------------|
| Lithium-ion | 0-6 hour | Up to 100 MW+ | 10-15 years* | 85% | Annual degradation | Efficient power Energy dense Flexible | Flammable** Cycle life limited |
| Flow | 2-8 hour | Up to 100 MW+ | 20 years | 65-75% | Theoretically unlimited and can be discharged 100% | High cycle life/service life No degradation Not flammable | Reduced efficiency |

* Warrantees are around 7 years with 1-2 year workmanship warranties
 ** Note: flammability is dependent on specific chemistry used to develop battery. When considering any type of battery, including li-ion, it is important to discuss flammability issues with the vendor.
 Source: Lazard

Figura 8 Comparação técnica baterias (NRECA, COBANK, NRTC, NRUCFC, 2019)

Segundo a (NRECA, COBANK, NRTC, NRUCFC, 2019), a bateria de fluxo possui a vida em ciclos muito superior à bateria de lítio, além de outras vantagens como a não degradação anual e a possibilidade de descarga de 100% de sua capacidade, e tampouco apresenta muitos perigo que põe em risco a sua fabricação e transporte quanto

a bateria de lítio. Sem contar que é uma tecnologia que ainda não se desenvolveu totalmente e pode evoluir muito nos próximos anos.

Por outro lado, a bateria de lítio é muito mais madura comercialmente, a maioria das baterias que tem sido instalada nos últimos anos são dessa tecnologia (IRENA, 2019). A bateria de lítio tem uma grande vantagem frente à bateria de fluxo que é a sua eficiência superior, enquanto a bateria de íon de lítio possui uma eficiência corrente alternada-corrente alternada de 85% a bateria de fluxo se aproxima apenas de 75%. (NRECA, COBANK, NRTC, NRUCFC, 2019)

Alguns fabricantes da bateria de lítio à exemplo da empresa Saft, (SAFT, 2014), garantem que a bateria poderá trabalhar além da sua vida útil, uma vez que o conceito de vida útil está atrelado à manutenção da eficiência da bateria acima de tal percentual. Ou seja, ela poderia continuar seguir em funcionamento por mais tempo do que estipulado no próprio manual técnico do equipamento.

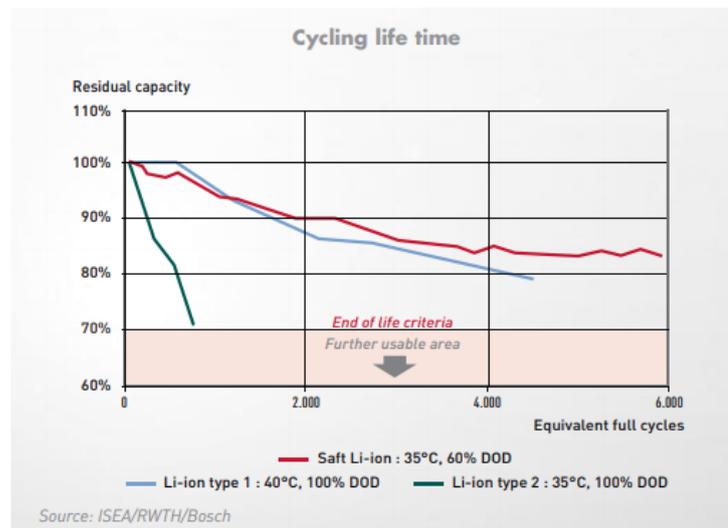


Figura 9 Vida útil em Ciclos Bateria de Lítio (SAFT, 2014)

Nos últimos anos o aprimoramento da tecnologia das baterias não pode ser ignorado. E a bateria que mais tem evoluído em um curto intervalo de tempo também foi a bateria de lítio, segundo estudo da (IRENA, 2019)

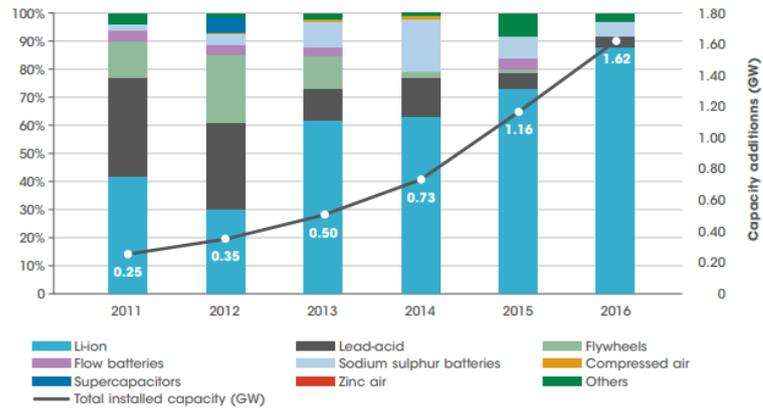


Figura 10 Aumento da Capacidade de Armazenamento (IRENA, 2019)

Por esses motivos citados acima foi decidido que a bateria escolhida para o estudo nesse trabalho de conclusão de curso será a bateria de íon de lítio.

A bateria será conectada diretamente no barramento AC conforme está ilustrado na figura 15:

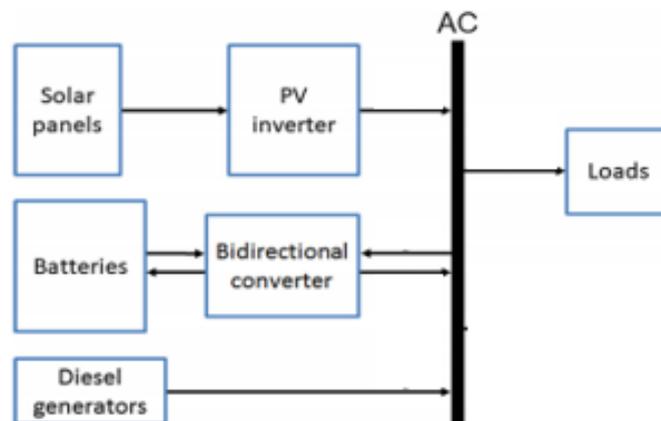


Figura 11 Configuração Proposta para a Usina (SAGE, 2019)

Essa conexão foi pensada de forma a facilitar a instalação da bateria, uma vez que ela possui uma instalação relativamente simples dentro do container e bastaria a integração no barramento AC. Vale ressaltar esse ponto, uma vez que o estudo é sobre uma usina já em operação e não seria possível a adaptação no layout sem sobre custos, que ainda impactariam também na indisponibilidade de geração de energia da mesma.

Porém, com essa configuração ocorrerão muito mais perdas de energia devido à conversão da energia em DC/AC em 3 etapas: do inversor solar para o barramento AC;

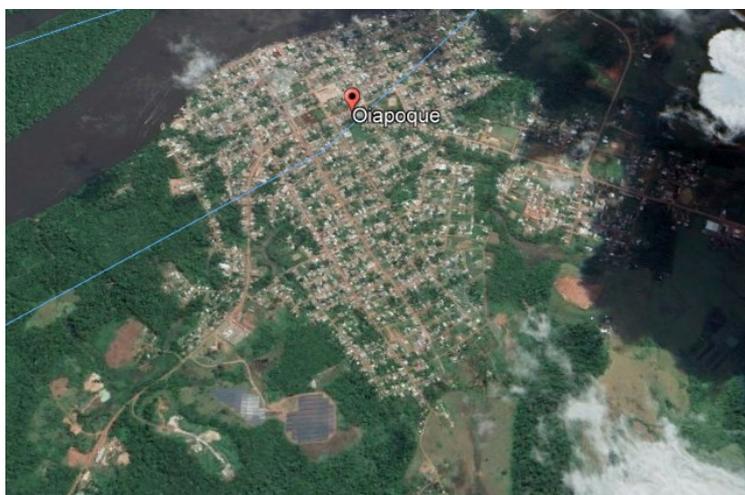
do barramento AC para a bateria e futuramente da bateria para o barramento AC novamente. (SAGE, 2019)

3. Apresentação do projeto

Em 2014, a empresa Voltalia Energia do Brasil conseguiu viabilizar um projeto de geração de energia para um sistema isolado no Oiapoque. O projeto foi viabilizado em um leilão o qual a empresa garantiu um contrato de venda de energia de 15 anos de geração de energia assinado com a Companhia de Eletricidade do Amapá – CEA. O contrato entrou em vigência em abril de 2016 e tem validade até abril de 2031 para o fornecimento de energia para a cidade do Oiapoque que contava com 24.000 habitantes na época.

E para esse contrato foi definido, para os primeiros cinco anos, a utilização de uma usina térmica com potência instalada de 12 MW seria responsável por suprir o consumo da cidade. E após os primeiros 5 anos de operação uma pequena central hidroelétrica de 7,5 MW, que ainda não foi construída, irá fornecer a maior parte da energia demandada pela cidade para os próximos 10 anos de duração do contrato de venda de energia.

Com o objetivo de reduzir o consumo de diesel a Voltalia incluiu no mesmo PPA, sem alterações no preço de venda de energia, o projeto da usina fotovoltaica do Oiapoque, usina a qual é objeto de estudo desse trabalho de conclusão de curso. No momento de sua concepção a UFV foi dimensionada para evitar a utilização de 15% do consumo de diesel do projeto. O que seria equivalente a 1,6 milhão de litros de diesel por ano. (VOLTALIA, 2017).



3.1 UTE Oiapoque

A usina térmica instalada no projeto do Oiapoque possui uma configuração com 10 máquinas Aggreko com capacidade de 1,2 MW em sobrecarga cada. Totalizando uma potência de 12 MW em sobrecarga. Valor considerado mais do que o suficiente para atender a demanda da cidade. A usina de geração térmica já opera desde novembro de 2015 com essa configuração.

É importante mencionar que a usina de geração elétrica do Oiapoque é responsável por atender toda a demanda da cidade do Oiapoque. Para isso ela conta com equipamentos auxiliares para identificar o quanto precisa produzir a cada instante. O controlador que opera de forma automatizada consegue medir através da variação da frequência (Hz) da rede se é o momento para aumentar ou reduzir a produção de energia elétrica.

Para a utilização adequada da máquina geradora a diesel considera-se uma produção mínima para cada máquina de 30% da sua capacidade total sem sobrecarga, o equivalente à 300MWh. Isso ocorre para não comprometer a vida útil do equipamento e preservar algumas peças dos geradores de energia à diesel a exemplo do próprio controlador de carga.

Como são considerados cenários os quais observa-se uma geração fotovoltaica superior a demanda da cidade consideramos no estudo o não desligamento de uma máquina geradora diesel, que trabalhará com a produção mínima permitida. Essa consideração é importante uma vez que a geração fotovoltaica depende das condições climáticas que podem variar muito em questão de minutos com o surgimento de nuvens. E tal medida foi pensada para evitar o desabastecimento energético da cidade. (VOLTALIA, 2017)

3.2 UFV - Oiapoque

A usina fotovoltaica do Oiapoque permite que parte da energia do município seja proveniente de fonte limpa e renovável, trazendo uma série de benefícios ao meio ambiente, à população local. A UFV começou a operar em dezembro de 2017 e desde então tem como objetivo principal reduzir o consumo de diesel da UTE. Tal redução no



Figura 14 Layout UFV Oiapoque (VOLTALIA, 2017)

A usina fotovoltaica se conecta à uma tensão de saída de 13,8 kV em média tensão e de lá é transmitida para a cidade para abastecer o consumo de energia elétrica da população do Oiapoque.

3.2.1 Equipamentos UFV

A UFV possui uma potência à pico de 4 MWp e potência AC de 3,3 MWac. E os principais equipamentos que compõem ela são:

- Módulo fotovoltaico P6C-30-DG Series – 3BB
 - Quantidade: 15.840
 - Fabricante: BYD
 - Potência à pico 255Wp

- Inversores fotovoltaicos CL25000
 - Quantidade: 132
 - Fabricante: Schneider Eletric
 - Potência AC: 25kW

- Estruturas metálicas
 - Quantidade de mesas: 330 mesas
 - Fabricante: Brametal

- Configuração: 2V x 24
- Módulos por mesa: 24
- Ângulo de inclinação: 7°

3.3 Expansão do Projeto

Para ser possível a análise da viabilidade técnico econômica da utilização de baterias, com a função de microgrid, deve-se estudar um cenário que a produção excedente seja verificada. Unindo esse fato ao objetivo secundário de redução das emissões de gases poluentes, foi decidido que a forma mais interessante de gerar essa produção excedente seria por meio da expansão da UFV.

Dessa forma seriam evitadas a emissão de toneladas de gases todos os anos e ainda assim supririam a demanda energética da cidade. Sem contar que a implementação de uma usina fotovoltaica é um investimento com pouco tempo de retorno financeiro, tal investimento no Brasil costuma ser pago entre 3 e 8 anos.

Para a expansão da UFV devem ser considerados novos equipamentos, uma vez que a tecnologia avançou muito desde a viabilização do projeto fotovoltaico do Oiapoque (2017) e existem equipamentos muito mais eficientes no mercado com preços muito mais em conta nos dias de hoje (2019), como já foi exposto na introdução.

Com base nisso uma nova configuração foi proposta para o projeto, uma configuração que atenda tecnicamente e seja capaz de produzir mais energia do que a anterior com a mesma potência instalada.

3.3.1 Novos Equipamentos

Os novos equipamentos escolhidos para essa configuração são:

- Módulos fotovoltaicos Longi LR6 HPH 380Wp
 - Fabricante: Longi
 - Quantidade: 10.556
 - Potência: 380Wp

- Inversor SG HX250:
 - Quantidade: 13
 - Fabricante: Sungrow
 - Potência: 250 kWac

- Estruturas Metálicas
 - Quantidade de mesas: 182 mesas
 - Fabricante: Brametal
 - Configuração: 2V x 29
 - Módulos por mesa: 24
 - Ângulo de inclinação: 7°

A tabela 1 pode explicitar a grande diferença em quantidade dos equipamentos para a UFV com potência praticamente iguais. A nova configuração possui equipamentos otimizados, mais potentes e mais eficientes.

Tabela 2 Comparação entre UFVs (Autor)

| Equipamentos | Configuração atual | Nova configuração |
|---------------------|---------------------------|--------------------------|
| Módulos | BYD | Longi |
| Quantidade | 15.840 | 10.556 |
| Potência | 255 | 380 |
| Eficiência | 15,75% | 19,20% |
| Inversores | Schneider Eletric | Sungrow |
| Quantidade | 132 | 13 |
| Potência | 25 | 250 |
| Eficiência | 98,30% | 99% |
| Estruturas | Brametal | Brametal |
| Quantidade | 330 | 182 |
| Configuração | 2V x 24 | 2V x 29 |

Com o auxílio do Software Pvsyst que simulou ambas as configurações, foi possível ver um ganho na produção de energia mesmo com a grande redução da área para a segunda configuração. Abaixo segue parte dos relatórios das simulações realizadas:

Na tabela 2 podem ser vistos os resultados das simulações realizadas no software Pvsyst, a tabela ilustra os ganhos que a nova configuração poderia trazer. Tais mudanças

debatidas nesse capítulo impactariam em uma grande redução nos custos para a viabilização do projeto. As mudanças também tornariam o empreendimento mais atrativo financeiramente, uma vez que ele irá fornecer uma performance superior e consequentemente maior produção de energia.

Tabela 3 Comparação de Produção UFV

| | Configuração atual | Nova configuração |
|--|--------------------|-------------------|
| Potência CC Wp | 4.039.200 | 4.011.280 |
| Potência CA W | 3.300.000 | 3.250.000 |
| Relação CC/AC | 1,22 | 1,23 |
| Área de módulos (m ²) | 25.650 | 20.880 |
| Redução de área (%) | - | 18,60% |
| Produção energética primeiro ano (MWh) | 5.028 | 5.336 |
| Ganho na produção (%) | - | 6,13% |

3.3.2 Escolha da Bateria

A bateria escolhida para o trabalho de conclusão de curso é do fabricante Saft. A solução proposta vem dentro de um contêiner 20 pés, onde estão armazenadas as baterias modulares. O transporte e a instalação são relativamente simples, uma vez que a mesma já vem com grande parte dos seus componentes já montados e seria necessária apenas a conexão, comissionamento e os testes.



Figura 15 Manual técnico Saft (Anexo 5)

O container também possui um sistema de refrigeração, o mesmo permite o funcionamento da bateria sem degradação por conta da temperatura, detalhe muito importante devido às características do local de instalação das baterias, o qual é muito úmido e quente.

Uma das principais características que levou a escolha dessa bateria é a alta capacidade de armazenamento de energia que ela possui.

| Main Characteristics | Intensium® Max 20 High Energy |
|---|--|
| Number of ESSU's per IM20 HE | 9 (fully populated) |
| Number of modules per ESSU | 14 |
| Cell type | Lithium Ion - NMC |
| DC Voltage Range | 672V to 923V; 811V nominal |
| Rated BoL Energy (DC) <small>Note 1</small> | 2.5 MWh |
| Discharge Power (DC) at Maximum Continuous Current (at 50% SOC) <small>Note 2</small> | 1.2 MW |
| Charge Power (DC) at Maximum Continuous Current (at 50% SOC) <small>Note 2</small> | 1.2 MW |
| Operating Temperature Range | -25°C to +55°C |
| Storage Temperature Range | -30°C to +55°C |
| Dimensions (L x W x H) <small>Note 3</small> | (6.1 x 2.4 x 2.9) m (19.9 x 8.0 x 9.5) ft |
| Ingress Protection (IP) Rating | IP54 |
| 20-foot Container Weight (kg) (includes HVAC) | < 30,000 |

Figura 16 Manual Técnico Saft (ANEXO E)

4. Modelo matemático

Nesse capítulo será explicitado todo o procedimento para a obtenção dos resultados que serão expostos no capítulo dos resultados.

4.1 Dimensionamento das baterias:

Para o dimensionamento da bateria optou-se por analisar a produção média de um ano inteiro. E a partir da análise horária desse dia médio deve-se dimensionar a bateria para armazenar a energia excedente produzida neste mesmo dia. Com esse dimensionamento parte do ano estará acima do que a bateria é capaz de armazenar, porém

o mesmo dimensionamento é capaz de absorver energia para a maior parte do ano que é verificada durante o período das chuvas.

Utiliza-se a média da produção excessiva nesse dia médio e multiplica-se esse valor pelas horas as quais ocorre essa produção excedente para encontrar a capacidade de armazenamento da bateria:

$$Q = E_{EXC} * H \quad (1)$$

Definimos a potência da bateria a partir da maior energia produzida em 1 hora desse dia médio entre os meses de maior produção de energia:

$$P = E_{EXCMáx} \quad (2)$$

Q é a energia que temos o interesse de armazenar na bateria, mas a utilização da bateria deve ser superdimensionada. Isso devido à existência de perdas atreladas à conversão da energia e também ao percentual da descarga aproveitável a serem levadas em consideração. Por isso um valor superior à Q deve ser estimado para permitir o armazenamento da energia almejada, adaptada de (VILLALVA, 2018). Tal valor será calculado da seguinte forma:

$$Q_{1ano} = \frac{Q}{S_{OC} * I_{ef} * RT_{ef}} \quad (3)$$

O S_{OC} é utilizado para superdimensionar a bateria, de forma que ela não entre na zona inferior do estado inicial de carga, o que poderia comprometer a vida útil da bateria, além de trabalhar em uma eficiência de carga/descarga abaixo da que poderia. (SAFT, 2014).

RT_{ef} é a eficiência da própria bateria, tanto no momento do carregamento como no momento da descarga.

A bateria a cada ano sofre uma perda devido à degradação anual da mesma. Isso ocorre devido à perda de uma pequena parcela do seu potencial de armazenamento todos os anos, decorrente das reações químicas da própria bateria. Tal perda pode ser mensurada de maneira simplificada da seguinte forma:

$$E_{bateriai} = E_{bateriai} * (1 - \beta)^i \quad (4)$$

β é a degradação anual em sua capacidade de armazenamento que a bateria de íon de lítio sofre durante o seu envelhecimento.

Considera-se a solução de armazenamento da bateria isolada termicamente, ou seja, ela não sofre a influência da temperatura e umidade do ambiente externo, pois foi instalada em ambiente climatizado.

4.2 Balanço energético

Para iniciarmos a análise de forma apropriada os parâmetros calculados devem ser analisados em uma escala diária. Ou seja, com variações horárias para incluirmos nessa análise o período de tempo o qual ocorre a produção de energia da UFV.

Isso será extremamente necessário nos casos que ocorre a produção excessiva da UFV, a partir do cenário 3. Os dados utilizados para a análise foram medidos de hora em hora pelo ano inteiro, o que nos dá um total de 8760 amostras de geração de energia.

Para iniciarmos a análise de forma apropriada devemos ter em mente que os parâmetros calculados devem ser analisados em numa escala diária. Ou seja, com variações horárias para incluirmos nessa análise o período de tempo o qual ocorre a produção de energia da UFV.

Como a usina do Oiapoque supre 100% da demanda da cidade podemos considerar como ponto de partida para o cálculo da demanda a fórmula abaixo:

$$D_1 = D_{sc} \quad (5)$$

D_{sc} é a demanda da cidade medida pelo sistema de controle de dados presente na usina fotovoltaica.

A demanda se manterá a mesma independente do cenário apresentado, ela irá apenas variar de acordo com o passar dos anos devido ao aumento no consumo da cidade. De acordo com a fórmula abaixo:

$$D_i = D_1 * (1 + x)^{(i)} \quad (6)$$

X é o crescimento do consumo de energia elétrica anual da cidade do Oiapoque.

Nesse trabalho de conclusão de curso trabalharemos com 6 cenários distintos, dando ênfase nos cenários que a bateria poderia ser instalada, nos cenários 3, 4 e 5. E para cada um deles iremos adotar premissas iniciais distintas para a produção de energia da UFV:

1. Cenário UTE. Cenário o qual a UFV ainda não havia sido construída

$$E_{UFV1} = 0 \quad (7.1)$$

2. Cenário atual. Cenário o qual a UFV já está operando e temos a produção medida pelo sistema de controle de dados.

$$E_{UFV1} = E_{UFVSC} \quad (7.2)$$

E_{UFVSC} é a produção de energia elétrica por conta da usina fotovoltaica medido pelo sistema de controle de dados.

3. Cenário 3 x UFV. Cenário o qual a UFV já está operando e consideramos a produção do sistema de controle de dados e a produção simulada pelo Pvsyst dobrada.

$$E_{UFV1} = E_{UFVSC} + 2 * E_{pvLongi} * F \quad (7.3)$$

$E_{pvLongi}$ é a produção da usina fotovoltaica simulada pelo software *PVsyst*, com novos equipamentos. F é um fator de correção proveniente da correlação entre a energia simulada e a energia realmente medida da usina fotovoltaica em operação.

4. Cenário 4 x UFV. Cenário o qual a UFV já está operando e consideramos a produção do sistema de controle de dados e a produção simulada pelo Pvsyst triplicada.

$$E_{UFV1} = E_{UFVSC} + 3 * E_{pvLongi} * F \quad (7.4)$$

5. Cenário 5 x UFV. Cenário o qual a UFV já está operando e consideramos a produção do sistema de controle de dados e a produção simulada pelo Pvsyst quadruplicada.

$$E_{UFV1} = E_{UFVSC} + 4 * E_{pvLongi} * F \quad (7.5)$$

Para todos os cenários mencionados acima ocorre a degradação do módulo fotovoltaico que implicará numa perda de eficiência e conseqüentemente redução na energia produzida para cada ano.

$$E_{UFVi} = E_{UFVSC} * (1 - \varphi)^{(i)} + n * E_{pvLongi} * F * (1 - \alpha)^{(i)} \quad (8)$$

φ é a degradação anual da placa presente no parque em operação, do fabricante BYD. α é a degradação anual da placa proposta para a expansão do projeto, do fabricante Longi.

Para calcular a energia produzida pela UTE utilizaremos como base a equação abaixo:

$$E_{UTEi} = D_i - E_{UFVi} \quad (9)$$

Esse valor em hipótese nenhuma pode ser negativo, o que aconteceria nos momentos em que a produção da UFV superar a demanda da cidade. Para impedir que isso aconteça é necessária a realização de uma correção na formulação da energia produzida pela UTE.

Se a energia produzida pela UTE for menor do que energia mínima definida para o bom funcionamento de 01 máquina ela irá se limitar a esse valor mínimo de produção. De forma que:

$$\begin{array}{ll} \text{Se} & E_{UTEi} < E_{UTEmin} \\ \text{Então} & E_{UTEi} = E_{UTEmin} \end{array} \quad (10)$$

Nos casos que possuímos a produção excessiva de energia da UFV, é verificado a condição $E_{UTEi} < 0$, devemos analisar a possibilidade de aproveitamento dessa energia. Isso poderia ocorrer por meio da utilização de um sistema de armazenamento de energia com baterias. Essa energia excedente pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\begin{array}{ll} \text{Se} & E_{UTEi} < 0 \\ \text{Então} & E_{EXCCAi} = -(E_{UTEi}) + E_{UTEmin} \end{array} \quad (11.1)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Se} & 0 < E_{UTEi} < E_{UTEmin} \\ \text{Então} & E_{EXCCAi} = E_{UTEmin} - (E_{UTEi}) \end{array} \quad (11.2)$$

$$\text{Caso contrário} \quad E_{EXCCAi} = 0 \quad (11.3)$$

A bateria proposta nesse trabalho de conclusão de curso, será conectada no barramento de corrente alternada. De forma que a energia excedente antes de poder ser armazenada pela corrente terá que passar por outro inversor de corrente. Esse inversor de corrente já está incluído na solução de armazenamento de energia proposta. Porém, com essa conversão de energia ocorre uma pequena perda de acordo com o inversor.

$$E_{EXCCci} = E_{EXCCAi} * I_{ef} \quad (12)$$

I_{ef} é a eficiência dos inversores, capazes de trocar a corrente de corrente alternada para contínua e vice versa.

A energia excedente para ser armazenada dentro de baterias pode sofrer uma série de reduções. Dentre elas algumas reduções referentes à própria disposição das conexões elétricas e outras referente ao funcionamento da própria bateria. A bateria possui a sua capacidade máxima de armazenamento, mesmo que a energia excedente seja maior do que isso, só uma parcela da energia poderá ser armazenada, o resto será perdido por subdimensionamento.

$$\begin{aligned} \text{Se} \quad & E_{EXCCi} > E_{bateriareali} \\ & E_{EXCCi} = E_{bateriareali} \end{aligned} \quad (13)$$

Consideramos isso para cada ciclo da bateria, para o caso estudado a bateria realiza um ciclo por dia.

A potência da bateria limita tanto à carga como a descarga da bateria, dessa forma a energia excedente de determinada hora só pode ser injetada caso seja inferior à potência da bateria.

$$\begin{aligned} \text{Se} \quad & E_{EXCCi} > P_{reali} \\ & E_{EXCCi} = P_{reali} \end{aligned} \quad (14)$$

Durante o próprio processo de carregamento e de descarregamento da bateria algumas perdas são verificadas derivadas da própria eficiência do fabricante

$$E_{armazenada} = E_{EXCCi} * RT_{ef} \quad (15)$$

Uma vez que uma bateria foi dimensionada corretamente poderemos armazenar na bateria a energia excedente da UFV durante o período do dia. Mais tarde durante o mesmo ciclo da bateria ela poderá efetuar uma descarga em um momento o qual não ocorra a produção da UFV, reduzindo a necessidade de produção da UTE.

Nesse novo cenário utilizaremos novamente a fórmula (15) considerando as perdas de eficiência da bateria dessa vez durante o processo de descarga. E também a fórmula (12) para a conversão da energia em corrente alternada novamente. Para descobrirmos o total de litros economizados com a utilização da bateria deve-se utilizar a fórmula abaixo considerando o consumo específico:

$$L_{diesel} = E_{armazenada} * \rho \quad (16)$$

ρ é o consumo específico do óleo diesel.

4.3 Análise financeira

De acordo com cada projeto a ser desenvolvido, diferentes tipos de indicadores de viabilidade econômico-financeiros podem ser utilizados. Geralmente, ferramentas como análise do payback, do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno são suficientes para uma avaliação se o projeto é atrativo ou não.

O valor presente líquido (VPL) é feito atualizando o fluxo de caixa de um investimento para toda a duração do projeto para o valor de hoje, parâmetro essencial para definir a rentabilidade do investimento. Segundo (GITMAN, 2010) o valor presente líquido (VPL) apresenta a seguinte condição: Se $VPL > 0$ o projeto é viável financeiramente, se $VPL < 0$ o investimento não é viável, se for igual a zero ele não trouxe nem lucro nem prejuízo para o investidor.

Para a obtenção do valor do investimento inicial da bateria foi utilizado um valor associado à energia armazenada. Chegou-se a um valor que corresponde à um valor médio referente a diferentes propostas técnico comerciais que obtive acesso.

Dentro desse valor está incluso não só o custo da bateria, mas de todo o sistema integrado que permite tanto a conversão da energia como o controle da operação. Também foi considerado um custo adicional referente à instalação das baterias. Esse custo de instalação contempla os trabalhos civis e de montagem elétrica de todas as conexões necessárias.

$$Capex = Q_{real} * (C_{bat} + C_{serv}) \quad (17)$$

Para realiza-se uma análise financeira simples precisaríamos definir alguns parâmetros que impactariam consideravelmente o projeto e a sua variação no decorrer dos anos. Ainda mais para um projeto que irá durar mais do que 20 anos. Para esse projeto leva-se em consideração a flutuação dos custos durante os anos. O custo do diesel para os anos futuros pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$C_{Diseli} = C_{Dieselo} * (1 + I)^{(i)} \quad (18)$$

Sendo que I é a inflação considerada para o decorrer do projeto.

Para a manutenção dos equipamentos ocorrerão reajustes no preço dos mesmos de acordo com a inflação. O custo de operação também pode ser calculado a partir da mesma equação:

$$C_{opexi} = C_{opexo} * (1 + I)^{(i)} \quad (19)$$

Por outro lado, a parte positiva do fluxo de caixa será providenciada por meio da economia gerada pela bateria. Esse valor pode ser calculado pela redução no consumo de diesel e também levando em consideração o custo do diesel nesse determinado ano.

$$E_{Dieseli} = L_{Dieseli} * C_{Dieseli} \quad (20)$$

Para realizar a análise do fluxo de caixa da usina híbrida e analisarmos se o investimento realizado está sendo pago devemos estudar o saldo do mesmo.

$$S = E_{Dieseli} - C_{opexi} \quad (21)$$

Levando em consideração a constante evolução e aprimoramento dos processos fabris considera-se um desconto anual no custo do sistema de armazenamento de bateria. Tal desconto é explicitado na fórmula abaixo:

$$E_{Diesel} = L_{Diesel} * C_{Diesel} \quad (22)$$

E tal variável deve ser analisada ano após ano. O saldo é uma variável muito importante para a análise financeira, uma vez que quando $S=0$ significa que o investimento inicial do projeto alcançado, e o tempo decorrido para esse acontecimento é o payback.

Segundo (BRAGA, 2011) e (GITMAN, 2010) para a obtenção do VPL devemos considerar o custo de capital, o capex, o saldo de cada ano e a duração do projeto. Como pode ser observado na equação abaixo:

$$VPL = \frac{\sum_1^i Saldo}{(1 + CC)^i} - Capex \quad (23)$$

Outro indicador financeiro a ser considerado é a TIR, taxa interna de retorno, ela pode ser calculada pela fórmula do VPL, quando o mesmo possui o valor igual a 0, segundo (GITMAN, 2010).

$$0 = \frac{\sum_1^i Saldo}{(1 + TIR)^i} - Capex \quad (24)$$

5. Explicação dos cenários

Nesse trabalho de conclusão de curso serão estudados diferentes cenários para a usina geradora de energia elétrica do Oiapoque. Dentre os cenários presentes no estudo, serão analisados cenários o anterior, o qual a UFV não havia sido implementada, até a expansão da usina com essa possuindo uma potência muito superior à que possui agora.

Para o cenário anterior e para o atual estão sendo apenas considerados os dados provenientes do sistema de controle de dados da UFV e a usina UFV e UTE. Esses dados foram medidos no intervalo entre setembro de 2018 e agosto de 2019.

O cenário anterior será estudado apenas para quantificar a quantidade de óleo diesel que estaria sendo consumida caso a instalação da UFV não tivesse ocorrido. E a partir disso verificaríamos a redução do consumo de diesel para cada cenário em diante.

No cenário atual a geração será mapeada tanto nos melhores dias do ano como nos piores para estudar a variação da produção energética ao longo do ano. O mesmo será feito para a energia demandada pela cidade, é necessário avaliar se o consumo da cidade acompanha as variações na produção de energia.

Para evoluir na análise e responder os objetivos propostos para o trabalho alguns cenários serão priorizados. A análise terá o foco em cenários a produção excedente da UFV seja verificada para estudar a viabilidade ou não da utilização de sistemas de armazenamento com baterias. Os cenários em que essas condições foram verificadas são: cenário 3, 4 e 5.

Algumas premissas foram tomadas para ser possível uma análise mais realista do consumo de diesel ao longo do projeto:

- Degradação do módulo fotovoltaico BYD: 0,7%/ano

O fabricante do módulo (BYD) explicitou no datasheet que a degradação é de no mínimo 0,4% por ano (Anexo A). Mas atualmente os módulos mais modernos possuem degradação de 0,55%/ano. Considerei o valor de 0,7% um pouco mais conservador considerando que houve um grande avanço tecnológico de 2017 para 2019.

- Degradação do Módulo fotovoltaico Longi: 0,55%/ano

Dado extraído do manual técnico do fabricante (Anexo C).

- Aumento da demanda da cidade: 2%/ano

Segundo a resenha mensal de setembro de 2019 publicada pela EPE os sistemas isolados sofreram um aumento do consumo de apenas 0,6% nos últimos 12 meses.

| REGIÃO/CLASSE | EM SETEMBRO | | | ATÉ SETEMBRO | | | 12 MESES | | |
|-------------------------------------|-------------|--------|------|--------------|---------|------|----------|---------|------|
| | 2019 | 2018 | % | 2019 | 2018 | % | 2019 | 2018 | % |
| BRASIL | 39.183 | 38.961 | 0,6 | 358.260 | 354.429 | 1,1 | 478.651 | 473.118 | 1,2 |
| RESIDENCIAL | 11.365 | 11.130 | 2,1 | 105.453 | 102.695 | 2,7 | 140.372 | 136.774 | 2,6 |
| INDUSTRIAL | 13.791 | 14.095 | -2,2 | 125.058 | 127.006 | -1,5 | 167.678 | 169.672 | -1,2 |
| COMERCIAL | 7.251 | 7.031 | 3,1 | 68.230 | 65.872 | 3,6 | 90.988 | 88.293 | 3,1 |
| OUTROS | 6.776 | 6.706 | 1,1 | 59.519 | 58.856 | 1,1 | 79.614 | 78.379 | 1,6 |
| CONSUMO TOTAL POR SUBSISTEMA | | | | | | | | | |
| SISTEMAS ISOLADOS | 249 | 246 | 1,2 | 2.150 | 2.136 | 0,7 | 2.924 | 2.907 | 0,6 |
| NORTE | 2.986 | 2.752 | 8,5 | 24.670 | 24.651 | 0,1 | 32.958 | 33.746 | -2,3 |
| NORDESTE | 5.942 | 6.016 | -1,2 | 55.417 | 54.204 | 2,2 | 74.601 | 72.974 | 2,2 |
| SUDESTE/C.OESTE | 23.064 | 23.041 | 0,1 | 209.682 | 208.172 | 0,7 | 280.432 | 277.284 | 1,1 |
| SUL | 6.943 | 6.906 | 0,5 | 66.341 | 65.267 | 1,6 | 87.738 | 86.206 | 1,8 |

Figura 17 Resenha Mensal (EPE, 2019)

Porém, segundo (IBGE, 2019) a cidade do Oiapoque tem a população estimada em 27.270 habitantes para 2019. Em 2010 eram 20.509 habitantes, de acordo com o senso da mesma instituição. Crescimento que gira em torno de 3% ao ano.

Tendo acesso à essas 2 informações um valor médio de 2% foi utilizado para o aumento da demanda média da cidade.

- Produção específica: 270L/MWh

Sobre o valor da produção específica foram verificados que em boa parte dos meses realmente obtivemos o valor de 0,27 L/kWh. E para a manutenção do benefício de compra do diesel por meio do CCC é necessária a medição do consumo específico, e esse parâmetro deve estar abaixo do limite delimitado entre a Eletrobrás e a Voltalia.

Segundo a projeção dos Preços dos combustíveis líquidos para atendimento aos sistemas isolados em 2020, da EPE, o custo do óleo diesel para o estado do Amapá em 2020 vai estar em torno de R\$ 3,80. (EPE, 2019)

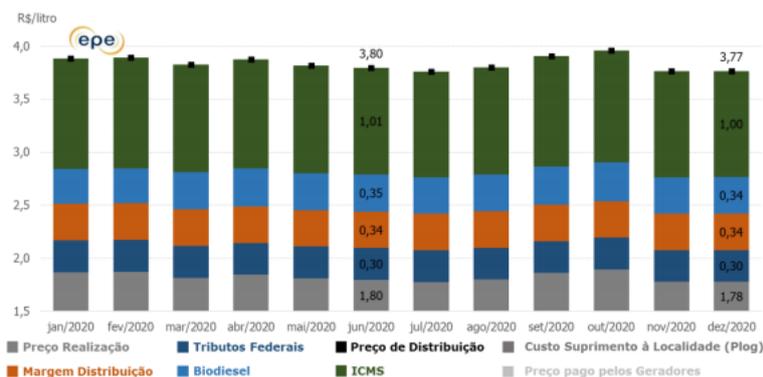


Gráfico 10 - Projeção do preço do diesel no Amapá

Figura 18 Previsão do Custo do Diesel Amapa para 2020 (EPE, 2019)

- Reajuste anual de 2% no custo do óleo diesel.

Foi adotada para esse projeto de conclusão de curso uma premissa de que o custo do diesel vai variar 2% ao ano.

- Sem restrições de áreas

Boa parte dos estudos que serão desenvolvidos nos próximos capítulos serão derivados da expansão da UFV. Porém, não são consideradas limitações do terreno para os cálculos. Considera-se que o terreno necessário para a implementação da UFV já está disponível e tampouco são considerados os custos de arrendamento e indenizações para proprietários dos terrenos.

- O preço da venda de energia do projeto não será abordado.

Para o presente estudo de viabilidade econômica o foco da economia gerada será a partir da redução no custo a ser pago pelo óleo diesel e não à venda da energia. Mesmo que esse seja o principal parâmetro para medir o faturamento da empresa.

6. Resultados

6.1 Análise preliminar

A usina do Oiapoque no presente momento está configurada com a UTE com capacidade instalada de 10MW e com a UFV com capacidade instalada de 4MWp. E a base da análise para esse cenário são os dados obtidos por meio do sistema de controle de dados instalada na usina.

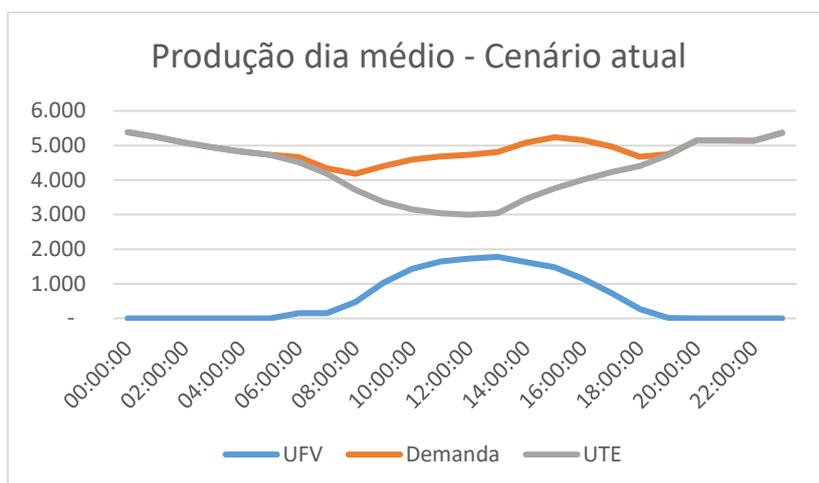


Figura 19 Produção dia médio – Cenário atual

Como pode ser observado na Figura 23 a utilização da UFV é muito inferior à real demanda da cidade.

Por mais que os meses de junho a julho possuam uma radiação superior à média anual, eles ainda fazem parte do período de chuvas. E os únicos meses que possuem baixa incidência de chuva são agosto, setembro e outubro, consequentemente possuem a maior produção de energia do ano. As afirmações acima podem ser confirmadas pelo arquivo climatológico (TAVARES, 2014; GITMAN, 2010)

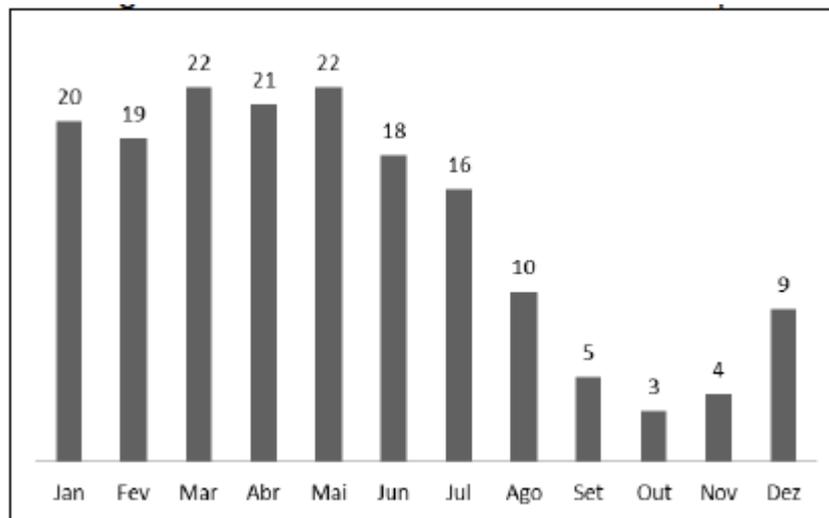


Figura 20 Número de dias com chuva Macapá (Artigo)

Por outro lado, pode-se dizer que a demanda da cidade respeita o mesmo comportamento. Nos meses sem chuva observa-se ainda na Figura 23 um aumento considerável no consumo na cidade, muito devido à utilização de aparelhos condicionadores de ar e ventiladores. Enquanto nos meses de chuva e no inverno esse consumo de energia é consideravelmente reduzido. Isso é favorável à UFV uma vez que os meses que possuímos a maior produção de energia também são os meses com maior demanda da cidade, e o oposto também é verificado, quando se produz menos energia na UFV a cidade também demanda menos energia. O que pode ser verificado na tabela 3:

Tabela 4 Produção ao Longo do ano

| Cenário atual | | | |
|----------------------|------------|----------------|------------|
| Mês | UFV | Demanda | UTE |
| set-18 | 521.547 | 3.779.794 | 3.258.247 |
| out-18 | 464.438 | 4.057.099 | 3.592.660 |
| nov-18 | 404.640 | 3.763.057 | 3.358.417 |
| dez-18 | 322.361 | 3.230.557 | 2.908.197 |
| jan-19 | 335.890 | 3.324.881 | 2.988.991 |
| fev-19 | 373.611 | 3.043.878 | 2.670.268 |
| mar-19 | 457.806 | 3.571.200 | 3.113.394 |
| abr-19 | 374.225 | 3.377.151 | 3.002.927 |
| mai-19 | 357.908 | 3.615.096 | 3.257.188 |
| jun-19 | 414.658 | 3.555.318 | 3.140.660 |
| jul-19 | 446.889 | 3.577.819 | 3.130.930 |
| ago-19 | 505.255 | 3.891.659 | 3.386.404 |

Com os dados obtidos pelo sistema de controle de dados pode ser feita a análise dos melhores e piores dias de produção de energia da UFV. A tabela 4 possui uma escala de cores para facilitar a compreensão dos dados (vermelho para as piores produções e verde para as melhores) e pode-se visualizar a variação entre os piores dias do ano. Para realizar análises pontuais a tabela auxilia na escolha de um dia que não possui um valor muito discrepante dos demais. Isso é importante uma vez que algum erro de medição poderia ser aferido pelo sistema de controle de dados ou alguma manutenção a qual o sistema de controle de dados pudesse estar desconectado da rede gerando uma produção discrepante dos demais dias do mês.

Tabela 5 Piores Dias do Ano (Autor)

| Piores dias do ano | | | | | |
|--------------------|------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| Setembro/18 | Outubro/18 | Novembro/18 | Dezembro/18 | Janeiro/19 | Fevereiro/19 |
| 9509 | 6968 | 2321 | 986 | 4329 | 8153 |
| 11103 | 10919 | 7047 | 1329 | 6070 | 9214 |
| 12934 | 10998 | 7156 | 5568 | 8011 | 9560 |
| 14033 | 11374 | 8675 | 6166 | 8332 | 9753 |
| 14643 | 11374 | 8897 | 6328 | 8370 | 10597 |
| Março/19 | Abril/19 | Maió/19 | Junho/19 | Julho/19 | Agosto/19 |
| 7607 | 1241 | 5529 | 8532 | 8109 | 10371 |
| 12532 | 4416 | 6606 | 9251 | 9496 | 10833 |
| 12576 | 4630 | 6862 | 10513 | 10685 | 11168 |
| 12723 | 5177 | 7098 | 11165 | 10711 | 11448 |
| 12838 | 6881 | 7732 | 11989 | 10830 | 13071 |

A partir da amostragem acima pode ser verificado que alguns dias do mês possuem uma produção de energia muito diferente dos demais. Por exemplo, no dia 03 de dezembro onde a produção é de apenas 1.329 kWh. Ao investigar o que ocorreu nesse dia foi descoberto que um curto circuito interno em um dos transformadores da usina aconteceu, motivo pelo qual a geração de energia desse dia foi comprometida. Tal tabela se mostrou importante justamente para analisar os dias que existem indisponibilidade na produção da UFV e não os utilizar como base para comparações de produção.

O mesmo vale para a amostragem dos melhores dias de produção de energia, como pode ser visto na tabela 6. Pode ser verificado algum erro de medição no sistema de controle de dados. No dia 07 de outubro de 2018 foi verificado um valor atípico de produção, às 6:00 da manhã desse dia foi verificada uma produção superior aos demais

dias do ano. Um erro de medição no sistema de controle de dados, com a verificação desse erro o dia em questão deve ser excluído de qualquer análise individual na produção de energia.

Tabela 6 Melhores Dias do Ano (Autor)

| Melhores dias do ano | | | | | |
|----------------------|------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| Setembro/18 | Outubro/18 | Novembro/18 | Dezembro/18 | Janeiro/19 | Fevereiro/19 |
| 20731 | 41509 | 21171 | 17853 | 15966 | 18064 |
| 20557 | 19500 | 19287 | 16803 | 15079 | 17944 |
| 19662 | 19335 | 17770 | 16641 | 14062 | 16730 |
| 19647 | 18961 | 17191 | 15286 | 13690 | 16534 |
| 19563 | 18853 | 16798 | 14886 | 13482 | 16193 |
| Março/19 | Abril/19 | Maió/19 | Junho/19 | Julho/19 | Agosto/19 |
| 18885 | 18879 | 18072 | 18507 | 18902 | 19702 |
| 18711 | 17680 | 17372 | 17731 | 18862 | 19263 |
| 17796 | 17421 | 15521 | 17667 | 18588 | 19115 |
| 16656 | 16876 | 15298 | 16817 | 18561 | 19095 |
| 16176 | 16671 | 15189 | 16754 | 18520 | 18889 |

A partir dos dados das tabelas 5 e 6 foram escolhidos 2 dias com cenários opostos na produção de energia:

- O dia 14 de setembro de 2018 que possui uma das melhores produções de energia diárias verificada, com o valor de 20.731 kWh. Sem considerar meses com picos de produção desconexos dos demais dias. Esse dia faz parte do período de sol.
- O dia 26 de dezembro de 2018 que possui uma das menores produções de energia com o valor de 5.568 kWh de todo o ano. Retirando da análise dias que possuem produções de energia muito discrepantes, passíveis de estarem com indisponibilidade parcial da UFV.

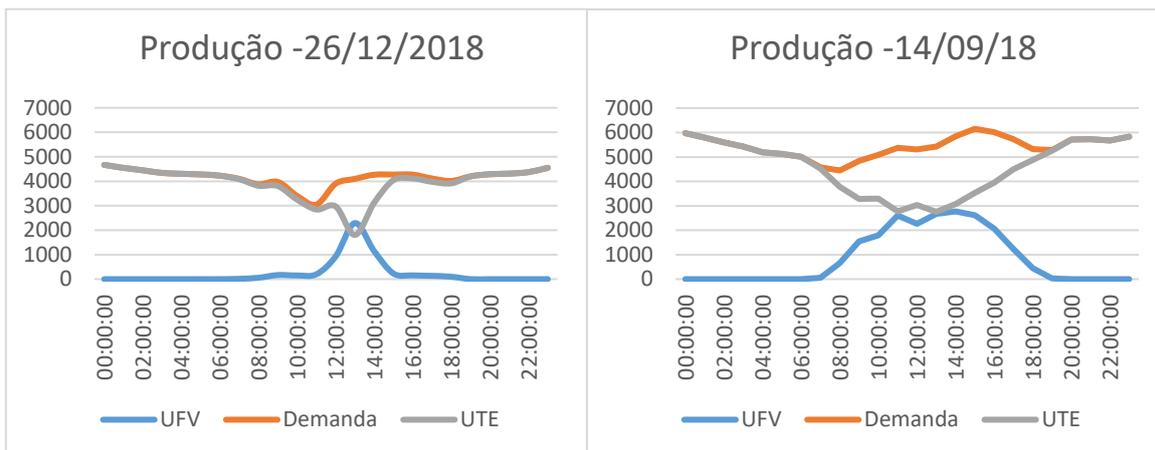


Figura 21 Produção Melhor e Pior dia (Autor)

6.2 Cenário 3

Foi definido previamente que o cenário 3 é composto por parte da usina fotovoltaica em operação e conta com a expansão da usina com uma nova configuração. Essa expansão possui uma potência de aproximadamente o dobro da anterior, e ainda mais eficiente, como foi explicitado no capítulo 3. Na tabela 7 pode ser vista potência total definida para o parque fotovoltaico.

Tabela 7 Potência - Cenário 3 (Autor)

| 3 UFV | |
|---------------|-------|
| Potência MWp | 12,06 |
| Potência MWac | 9,80 |

A seguir na tabela 9 é explicitado o balanço energético do cenário 3. Nele estão presentes dados extraídos do dia médio de produção fotovoltaica de um ano.

Tabela 8 Dimensionamento da bateria – Cenário 3 (autor)

| Hora | UFV x3 | Demanda | UTE | Prod Excedente |
|----------|--------|---------|------|----------------|
| 00:00:00 | 0 | 5382 | 5382 | 0 |
| 01:00:00 | 0 | 5248 | 5248 | 0 |
| 02:00:00 | 0 | 5078 | 5078 | 0 |
| 03:00:00 | 0 | 4939 | 4939 | 0 |
| 04:00:00 | 0 | 4820 | 4820 | 0 |
| 05:00:00 | 0 | 4731 | 4731 | 0 |
| 06:00:00 | 157 | 4668 | 4511 | 0 |
| 07:00:00 | 981 | 4340 | 3359 | 0 |
| 08:00:00 | 2400 | 4181 | 1781 | 0 |
| 09:00:00 | 3943 | 4403 | 460 | 0 |
| 10:00:00 | 5043 | 4587 | -456 | 756 |
| 11:00:00 | 5434 | 4682 | -752 | 1052 |
| 12:00:00 | 5636 | 4726 | -910 | 1210 |
| 13:00:00 | 5518 | 4814 | -704 | 1004 |
| 14:00:00 | 4978 | 5081 | 103 | 197 |
| 15:00:00 | 4119 | 5235 | 1116 | 0 |
| 16:00:00 | 2867 | 5154 | 2287 | 0 |
| 17:00:00 | 1424 | 4966 | 3542 | 0 |
| 18:00:00 | 268 | 4672 | 4404 | 0 |
| 19:00:00 | 16 | 4749 | 4733 | 0 |
| 20:00:00 | 0 | 5139 | 5139 | 0 |
| 21:00:00 | 0 | 5145 | 5145 | 0 |
| 22:00:00 | 0 | 5139 | 5139 | 0 |
| 23:00:00 | 0 | 5363 | 5363 | 0 |

Na tabela 8 pode ser visto o balanço energético presente da produção de um dia médio do ano. Utilizando as equações presentes no modelo matemático é possível calcular a energia excedente a ser armazenada na bateria, e foi definido que a bateria será dimensionada para um dia médio de produção fotovoltaica. Abaixo o cálculo do dimensionamento é explicado:

$$E_{EXC} = \frac{756 + 1052 + 1210 + 1004 + 197}{5} = 4.218 \text{ kWh}$$

Chegando nesse resultado agora basta multiplicar pelas horas de produção excedente para definir a energia total a ser armazenada para essa solução.

$$Q = E_{EXC} * H = 1.210 \text{ kWh}$$

A partir do cálculo da energia a ser armazenada na bateria, agora considera-se as perdas para o dimensionamento real da bateria:

$$Q_{1ano} = \frac{4.218}{(0,9 * 0,975 * 0,94)} = 5.141 kWh$$

Para ser possível armazenar a energia calculada anteriormente é necessária a utilização de 3 sistema de armazenamento de energia com capacidade de 2,5MWh cada um, uma vez que com 2 atingiríamos apenas 5MWh, o que seria insuficiente. Na tabela 9 pode ser verificada a energia armazenada no decorrer dos anos do projeto.

A tabela 9 mostra a degradação anual e com o valor definido de 3% ao ano, considerado até conservador, após comparação com ofertas técnico-comerciais recebidas. Também está representada na mesma tabela a real necessidade de armazenamento calculado, e é considerado uma queda de 10% ao ano, percentual referente à queda anual da produção excedente verificada nos cálculos realizados. Aumento justificado com o aumento da demanda ad cidade e redução da eficiência dos módulos.

Tabela 9 Variação da bateria - Cenário 3

| 3 x UFV | | | |
|---------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Ano | Compra bateria (MWh) | Capacidade da Bateria (MWh) | Estimativa da necessidade anual (MWh) |
| 0 | 7,50 | 7,50 | 5,14 |
| 1 | | 7,28 | 4,63 |
| 2 | | 7,06 | 4,16 |
| 3 | | 6,85 | 3,75 |
| 4 | | 6,64 | 3,37 |
| 5 | | 6,44 | 3,04 |
| 6 | | 6,25 | 2,73 |
| 7 | | 6,06 | 2,46 |
| 8 | | 5,88 | 2,21 |
| 9 | | 5,70 | 1,99 |
| 10 | | 5,53 | 1,79 |
| 11 | | 5,36 | 1,61 |
| 12 | | 5,20 | 1,45 |
| 13 | | 5,05 | 1,31 |
| 14 | | 4,90 | 1,18 |
| 15 | | 4,75 | 1,06 |
| 16 | | 4,61 | 0,95 |
| 17 | | 4,47 | 0,86 |
| 18 | | 4,33 | 0,77 |
| 19 | | 4,20 | 0,69 |
| 20 | | 4,08 | 0,63 |

Já na tabela 10, pode ser vista a compilação de todas as equações do capítulo 4.2 e do dimensionamento da bateria mencionado anteriormente. Os dados para cada ano foram

mensurados a partir da aplicação das equações para cada 8760 pontos de cada ano e os valores na tabela abaixo são a soma desses pontos para cada parâmetro.

Tabela 10 Análise Global - Cenário 3 (autor)

| 3x UFV | | | | | |
|--------|------------|---------------|---------------|---------------------|----------------------|
| Ano | UFV (kWh) | DEMANDA (kWh) | Bateria (kWh) | UTE - Bateria (kWh) | Economia Bateria (L) |
| 1 | 15.551.854 | 42.787.508 | 1.462.644 | 28.401.371 | 394.914 |
| 2 | 15.458.850 | 43.643.258 | 1.372.289 | 29.240.409 | 370.518 |
| 3 | 15.366.410 | 44.516.124 | 1.281.843 | 30.102.718 | 346.098 |
| 4 | 15.274.530 | 45.406.446 | 1.195.387 | 30.985.592 | 322.754 |
| 5 | 15.183.207 | 46.314.575 | 1.112.184 | 31.888.687 | 300.290 |
| 6 | 15.092.437 | 47.240.866 | 1.030.430 | 32.815.234 | 278.216 |
| 7 | 15.002.218 | 48.185.684 | 950.709 | 33.765.215 | 256.691 |
| 8 | 14.912.545 | 49.149.397 | 827.926 | 34.783.470 | 223.540 |
| 9 | 14.823.416 | 50.132.385 | 796.671 | 35.735.442 | 215.101 |
| 10 | 14.734.826 | 51.135.033 | 718.021 | 36.760.420 | 193.866 |
| 11 | 14.646.773 | 52.157.734 | 642.524 | 37.810.960 | 173.481 |
| 12 | 14.559.254 | 53.200.888 | 569.214 | 38.889.717 | 153.688 |
| 13 | 14.472.265 | 54.264.906 | 497.235 | 39.995.836 | 134.253 |
| 14 | 14.385.802 | 55.350.204 | 428.463 | 41.130.996 | 115.685 |
| 15 | 14.299.863 | 56.457.208 | 365.658 | 42.291.828 | 98.728 |
| 16 | 14.214.445 | 57.586.353 | 307.005 | 43.478.978 | 82.891 |
| 17 | 14.129.543 | 58.738.080 | 253.933 | 44.692.662 | 68.562 |
| 18 | 14.045.156 | 59.912.841 | 205.511 | 45.934.618 | 55.488 |
| 19 | 13.961.280 | 61.111.098 | 163.283 | 47.202.568 | 44.086 |
| 20 | 13.877.911 | 62.333.320 | 127.090 | 48.497.267 | 34.314 |

Na figura 22 foram levados em consideração a média de produção do primeiro ano, ponto a ponto para as 8760 horas. Com a utilização das mesmas equações de balanço energético e do dimensionamento da bateria do capítulo 4 foi possível a obtenção desses dados de geração de energia. Nesse gráfico é considerada a instalação da bateria Saft e suas limitações como a potência de carregamento, e a potência de descarga para efeito de cálculo. Para o cenário 3 não foi necessário restringir a descarga de energia, uma vez que o valor armazenado não superava à demanda da cidade em momento nenhum.

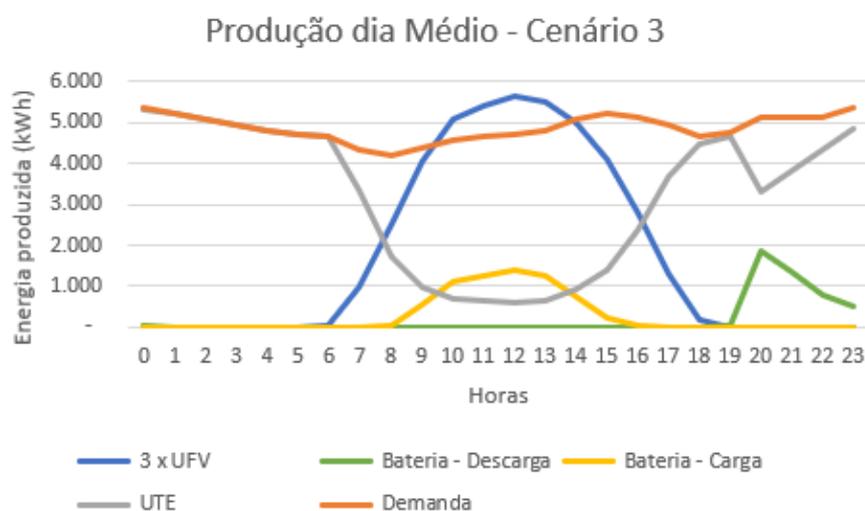


Figura 22 Geração de Energia Para Média do 1º ano – Cenário 3 (autor)

Na tabela 11 estão detalhados os custos para a totalidade do projeto, o custo de operação da bateria foi definido como R\$ 100.000 por ano, tal valor é aproximado e foi retirado de ofertas comerciais de baterias.

Tabela 11 Elaboração dos Custos - Cenário 3 (Autor)

| Anos | Redução no consumo com bateria (L) | Economia gerada pela bateria (R\$) | Opex Bateria (R\$) |
|------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| 1 | 394.914 | R\$ 1.500.673 | R\$ 100.000 |
| 2 | 370.518 | R\$ 1.436.128 | R\$ 104.000 |
| 3 | 346.098 | R\$ 1.368.303 | R\$ 108.160 |
| 4 | 322.754 | R\$ 1.301.536 | R\$ 112.486 |
| 5 | 300.290 | R\$ 1.235.164 | R\$ 116.986 |
| 6 | 278.216 | R\$ 1.167.257 | R\$ 121.665 |
| 7 | 256.691 | R\$ 975.427 | R\$ 126.532 |
| 8 | 223.540 | R\$ 849.452 | R\$ 131.593 |
| 9 | 215.101 | R\$ 817.384 | R\$ 136.857 |
| 10 | 193.866 | R\$ 736.689 | R\$ 142.331 |
| 11 | 173.481 | R\$ 659.229 | R\$ 148.024 |
| 12 | 153.688 | R\$ 584.014 | R\$ 153.945 |
| 13 | 134.253 | R\$ 510.163 | R\$ 160.103 |
| 14 | 115.685 | R\$ 439.603 | R\$ 166.507 |
| 15 | 98.728 | R\$ 375.165 | R\$ 173.168 |
| 16 | 82.891 | R\$ 314.987 | R\$ 180.094 |
| 17 | 68.562 | R\$ 260.535 | R\$ 187.298 |
| 18 | 55.488 | R\$ 210.854 | R\$ 194.790 |
| 19 | 44.086 | R\$ 167.528 | R\$ 202.582 |
| 20 | 34.314 | R\$ 130.394 | R\$ 210.685 |

O fluxo de caixa do projeto para o cenário 3 também foi calculado, para o mesmo foi considerada uma inflação de 4% ao ano. O investimento inicial do projeto foi calculado a partir da relação de USD 400.000 por MWh com outro valor adicional de R\$ 200.000 referentes aos custos de instalação de cada container. Valor que totalizou um investimento inicial de R\$ 12.900.000, para um dólar com cotação de R\$ 4,10.

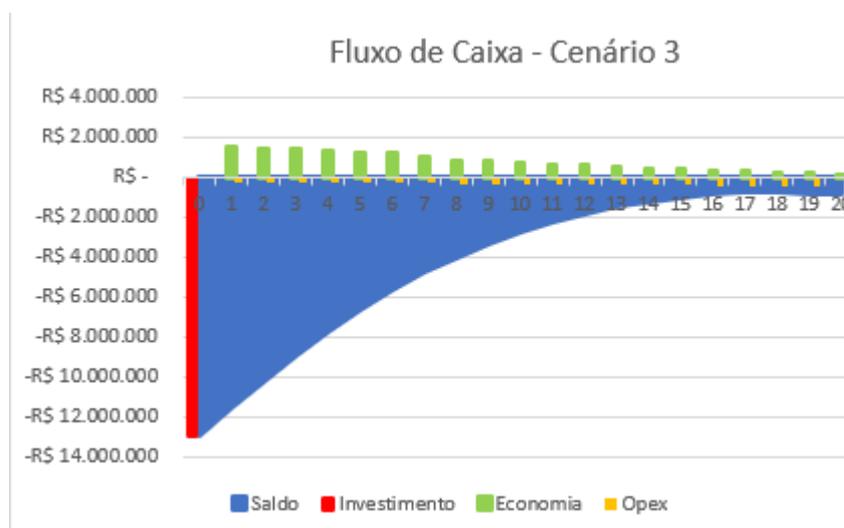


Figura 23 Fluxo de Caixa – Cenário 3 (autor)

Como pode ser visto na figura 23, o investimento não se paga pela duração do projeto. Uma vez que ele não fica positivo em momento algum. Outro indicativo financeiro, o VPL também foi calculado para uma taxa de atratividade de 8%.

$$VPL = -4.954.613$$

O VPL do projeto é negativo, ou seja, o investimento no projeto em tais condições não é rentável. Além do que a TIR do projeto também foi negativa.

6.3 Cenário 4

Foi definido previamente que o cenário 4 é composto por parte da usina fotovoltaica em operação e conta com a expansão da usina com uma nova configuração. Essa expansão possui uma potência de aproximadamente o triplo da anterior, sendo mais eficiente. Na tabela 12 pode ser vista potência total definida para o parque fotovoltaico.

Tabela 12 Potência Cenário 4 (autor)

| 4 UFV | |
|---------------|-------|
| Potência MWp | 16,07 |
| Potência MWac | 13,05 |

A seguir na tabela 13 é explicitado o balanço energético do cenário 4. Nele estão presentes dados extraídos do dia médio de produção fotovoltaica de um ano.

Tabela 13 Dimensionamento da bateria - Cenário 4

| Hour | UFV x4 | Demanda | UTE | Prod Excedente |
|----------|--------|---------|-------|----------------|
| 00:00:00 | 0 | 5382 | 5382 | 0 |
| 01:00:00 | 0 | 5248 | 5248 | 0 |
| 02:00:00 | 0 | 5078 | 5078 | 0 |
| 03:00:00 | 0 | 4939 | 4939 | 0 |
| 04:00:00 | 0 | 4820 | 4820 | 0 |
| 05:00:00 | 0 | 4731 | 4731 | 0 |
| 06:00:00 | 158 | 4668 | 4509 | 0 |
| 07:00:00 | 1396 | 4340 | 2944 | 0 |
| 08:00:00 | 3364 | 4181 | 816 | 0 |
| 09:00:00 | 5396 | 4403 | -992 | 1292 |
| 10:00:00 | 6847 | 4587 | -2260 | 2560 |
| 11:00:00 | 7330 | 4682 | -2648 | 2948 |
| 12:00:00 | 7589 | 4726 | -2863 | 3163 |
| 13:00:00 | 7388 | 4814 | -2574 | 2874 |
| 14:00:00 | 6652 | 5081 | -1571 | 1871 |
| 15:00:00 | 5439 | 5235 | -204 | 504 |
| 16:00:00 | 3727 | 5154 | 1428 | 0 |
| 17:00:00 | 1768 | 4966 | 3198 | 0 |
| 18:00:00 | 268 | 4672 | 4404 | 0 |
| 19:00:00 | 16 | 4749 | 4733 | 0 |
| 20:00:00 | 0 | 5139 | 5139 | 0 |
| 21:00:00 | 0 | 5145 | 5145 | 0 |
| 22:00:00 | 0 | 5139 | 5139 | 0 |
| 23:00:00 | 0 | 5363 | 5363 | 0 |

Na tabela 13 pode ser visto o balanço energético presente da produção de um dia médio do ano. Utilizando as equações presentes no modelo matemático é possível calcular a energia excedente a ser armazenada na bateria, e foi definido que a bateria será dimensionada para um dia médio de produção fotovoltaica. Abaixo o cálculo do dimensionamento é explicado:

$$E_{EXC} = \frac{1292 + 2560 + 2948 + 3163 + 2874 + 1871 + 504}{7} = 2.173kWh$$

Chegando nesse resultado agora basta multiplicar pelas horas de produção excedente para definir a energia total a ser armazenada para essa solução.

$$Q = E_{EXC} * H = 15.212 \text{ kWh}$$

A partir do cálculo da energia a ser armazenada na bateria, agora considera-se algumas perdas para o dimensionamento real da bateria:

$$Q_{1ano} = \frac{15.212}{(0,9 * 0,975 * 0,94)} = 18.537 \text{ kWh}$$

Para ser possível armazenar a energia calculada anteriormente é necessária a utilização de 8 sistema de armazenamento de energia com capacidade de 2,5MWh cada um. Na tabela 14 pode ser verificada a energia armazenada no decorrer dos anos do projeto.

Tabela 14 Duração da bateria - Cenário 4

| 4 x UFV | | | |
|---------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Ano | Compra bateria (MWh) | Capacidade da Bateria (MWh) | Estimativa da necessidade anual (MWh) |
| 0 | 20,00 | 20,00 | 18,54 |
| 1 | | 19,40 | 17,61 |
| 2 | | 18,82 | 16,73 |
| 3 | | 18,25 | 15,89 |
| 4 | | 17,71 | 15,10 |
| 5 | | 17,17 | 14,34 |
| 6 | | 16,66 | 13,63 |
| 7 | | 16,16 | 12,95 |
| 8 | | 15,67 | 12,30 |
| 9 | | 15,20 | 11,68 |
| 10 | | 14,75 | 11,10 |
| 11 | | 14,31 | 10,54 |
| 12 | | 13,88 | 10,02 |
| 13 | | 13,46 | 9,52 |
| 14 | | 13,06 | 9,04 |
| 15 | | 12,67 | 8,59 |
| 16 | | 12,29 | 8,16 |
| 17 | | 11,92 | 7,75 |
| 18 | | 11,56 | 7,36 |
| 19 | | 11,21 | 7,00 |
| 20 | | 10,88 | 6,65 |

A tabela 14 mostra a degradação anual e com o valor definido de 3% ao ano, considerado até conservador, após comparação com ofertas técnico-comerciais de diferentes baterias. Também está representada na mesma tabela a real necessidade de armazenamento calculado, e é considerado uma queda de 5% ao ano, percentual referente à queda anual da produção excedente verificada nos cálculos realizados.

Na tabela 15 pode ser vista a compilação das equações para todo o decorrer do projeto.

Tabela 15 Análise global do projeto - Cenário 4

| 4 x UFV | | | | | |
|---------|------------|---------------|---------------|---------------------|----------------------|
| Ano | UFV (kWh) | Demanda (kWh) | Bateria (kWh) | UTE - Bateria (kWh) | Economia Bateria (L) |
| 1 | 20.838.168 | 42.787.508 | 4.242.573 | 24.299.197 | 1.145.495 |
| 2 | 20.716.089 | 43.643.258 | 4.024.416 | 25.111.358 | 1.086.592 |
| 3 | 20.594.734 | 44.516.124 | 3.841.319 | 25.998.052 | 1.037.156 |
| 4 | 20.474.099 | 45.406.446 | 3.662.240 | 26.900.187 | 988.805 |
| 5 | 20.354.178 | 46.314.575 | 3.488.182 | 27.819.188 | 941.809 |
| 6 | 20.234.968 | 47.240.866 | 3.318.588 | 28.755.579 | 896.019 |
| 7 | 20.116.465 | 48.185.684 | 3.152.208 | 29.710.251 | 851.096 |
| 8 | 19.998.664 | 49.149.397 | 2.989.246 | 30.683.301 | 807.096 |
| 9 | 19.881.561 | 50.132.385 | 2.830.482 | 31.675.691 | 764.230 |
| 10 | 19.765.151 | 51.135.033 | 2.674.740 | 32.688.114 | 722.180 |
| 11 | 19.649.432 | 52.157.734 | 2.523.836 | 33.720.392 | 681.436 |
| 12 | 19.534.398 | 53.200.888 | 2.377.078 | 34.773.558 | 641.811 |
| 13 | 19.420.045 | 54.264.906 | 2.234.240 | 35.849.107 | 603.245 |
| 14 | 19.306.370 | 55.350.204 | 2.093.669 | 36.950.286 | 565.291 |
| 15 | 19.193.368 | 56.457.208 | 1.956.364 | 38.077.787 | 528.218 |
| 16 | 19.081.035 | 57.586.353 | 1.823.102 | 39.231.308 | 492.237 |
| 17 | 18.969.367 | 58.738.080 | 1.692.848 | 40.411.670 | 457.069 |
| 18 | 18.858.361 | 59.912.841 | 1.564.088 | 41.622.172 | 422.304 |
| 19 | 18.748.012 | 61.111.098 | 1.437.259 | 42.860.959 | 388.060 |
| 20 | 18.638.316 | 62.333.320 | 1.311.519 | 44.130.635 | 354.110 |

Na figura 28 foram levados em consideração a média de produção do primeiro ano, ponto a ponto para as 8760 horas. Com a utilização das mesmas equações de balanço energético e do dimensionamento da bateria do capítulo 4 foi possível a obtenção desses dados de geração de energia. Nesse gráfico é considerada a instalação da bateria Saft e suas limitações como a potência de carregamento, e a potência de descarga para efeito de cálculo.

Para o cenário 4 foi necessário restringir a descarga de energia, uma vez que o valor armazenado superava à demanda da cidade de alguns momentos, e dessa forma considerei que a descarga da bateria seria feita de forma gradual para poder escoar de acordo com a demanda da cidade.

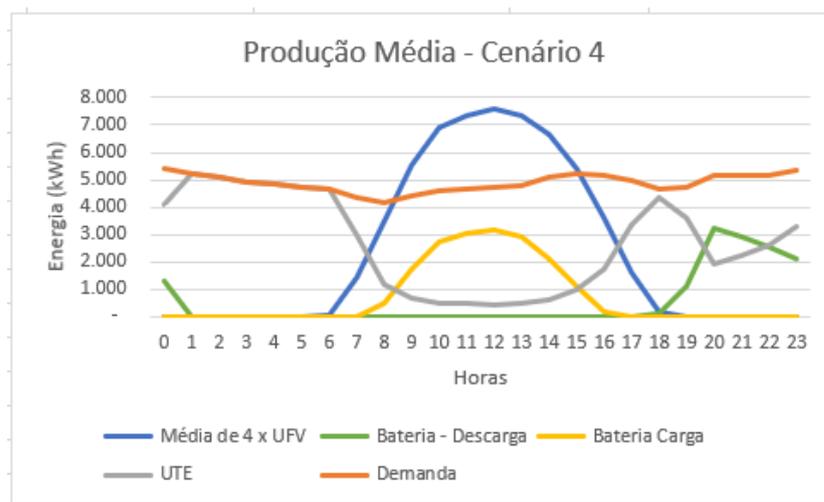


Figura 24 Geração de Energia Para Média do 1º ano – Cenário 4 (autor)

Na tabela 16 estão detalhados os custos para a totalidade do projeto, o custo de operação da bateria foi definido como R\$ 225.000 por ano, tal valor é aproximado e foi retirado de ofertas comerciais de fornecedores de baterias.

Tabela 16 Elaboração dos Custos Cenário 4

| Anos | Redução no consumo Bateria (L) | Economia gerada pela bateria (R\$) | Opex Bateria (R\$) |
|------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| 1 | 1.145.495 | 4.352.880 | R\$ 225.000 |
| 2 | 1.086.592 | 4.211.631 | R\$ 234.000 |
| 3 | 1.037.156 | 4.100.418 | R\$ 243.360 |
| 4 | 988.805 | 3.987.445 | R\$ 253.094 |
| 5 | 941.809 | 3.873.889 | R\$ 263.218 |
| 6 | 896.019 | 3.759.253 | R\$ 273.747 |
| 7 | 851.096 | 3.642.196 | R\$ 284.697 |
| 8 | 807.096 | 3.522.980 | R\$ 296.085 |
| 9 | 764.230 | 3.402.587 | R\$ 307.928 |
| 10 | 722.180 | 3.279.673 | R\$ 320.245 |
| 11 | 681.436 | 3.156.533 | R\$ 333.055 |
| 12 | 641.811 | 3.032.443 | R\$ 346.377 |
| 13 | 603.245 | 2.907.229 | R\$ 360.232 |
| 14 | 565.291 | 2.778.802 | R\$ 374.642 |
| 15 | 528.218 | 2.648.496 | R\$ 389.627 |
| 16 | 492.237 | 2.517.450 | R\$ 405.212 |
| 17 | 457.069 | 2.384.339 | R\$ 421.421 |
| 18 | 422.304 | 2.247.043 | R\$ 438.278 |
| 19 | 388.060 | 2.106.132 | R\$ 455.809 |
| 20 | 354.110 | 1.960.312 | R\$ 474.041 |

O fluxo de caixa do projeto para o cenário 4 também foi calculado, para o mesmo foi considerada uma inflação de 4% ao ano. O investimento inicial do projeto foi calculado a partir da relação de USD 400.000 por MWh com outro valor adicional de R\$ 200.000 referente aos custos de instalação por container. Valor que totalizou um investimento inicial de R\$ 34.400.000, para um dólar com cotação de R\$ 4,10.

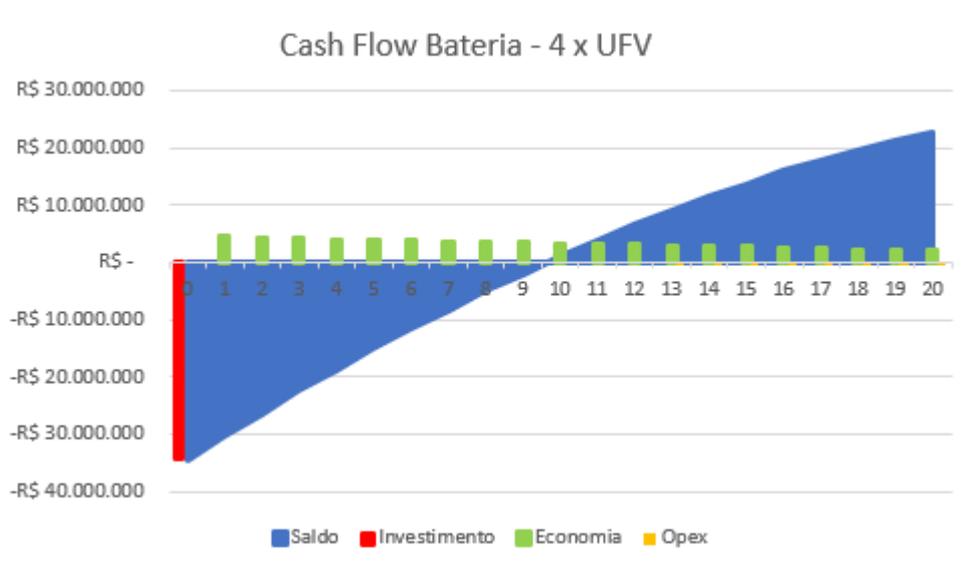


Figura 25 Fluxo de Caixa - Cenário 4 (autor)

Como pode ser visto na figura 25, temos o retorno do investimento no 10º ano de duração do projeto. Porém devemos levar em conta outro indicativo financeiro, o VPL, que também foi calculado.

$$VPL = -3.040.098$$

O VPL do projeto é negativo para o custo de capital de 8%, ou seja, o investimento no projeto em tais condições não é rentável. A TIR do projeto é de 6,6%, o que apresenta uma melhoria, porém, ainda é insuficiente para ser rentável financeiramente.

6.4 Cenário 5

Foi definido previamente que o cenário 5 é composto por parte da usina fotovoltaica em operação e conta com a expansão da usina com uma nova configuração. Essa expansão possui uma potência aproximadamente 4 vezes superior à configuração original. Na tabela 17 pode ser vista potência total definida para o parque fotovoltaico.

Tabela 17 Potência instalada - Cenário 5 (Autor)

| 5 x UFV | |
|--------------|-------|
| Potência MWp | 20,08 |
| Potência Mwc | 16,00 |

A seguir na tabela 18 é explicitado o balanço energético do cenário 5. Nele estão presentes dados extraídos da média dos meses com melhor produção de energia, para o dimensionamento da bateria.

Tabela 18 Dimensionamento Bateria - Cenário 5 (Autor)

| Hour | UFV x 5 (kWh) | Demanda (kWh) | UTE (kWh) | Prod excedente (kWh) |
|----------|---------------|---------------|-----------|----------------------|
| 00:00:00 | 0 | 5382 | 5382 | 0 |
| 01:00:00 | 0 | 5248 | 5248 | 0 |
| 02:00:00 | 0 | 5078 | 5078 | 0 |
| 03:00:00 | 0 | 4939 | 4939 | 0 |
| 04:00:00 | 0 | 4820 | 4820 | 0 |
| 05:00:00 | 0 | 4731 | 4731 | 0 |
| 06:00:00 | 160 | 4668 | 4508 | 0 |
| 07:00:00 | 1810 | 4340 | 2530 | 0 |
| 08:00:00 | 4329 | 4181 | -148 | 448 |
| 09:00:00 | 6848 | 4403 | -2445 | 2745 |
| 10:00:00 | 8651 | 4587 | -4063 | 4363 |
| 11:00:00 | 9227 | 4682 | -4544 | 4844 |
| 12:00:00 | 9542 | 4726 | -4816 | 5116 |
| 13:00:00 | 9258 | 4814 | -4444 | 4744 |
| 14:00:00 | 8326 | 5081 | -3244 | 3544 |
| 15:00:00 | 6759 | 5235 | -1524 | 1824 |
| 16:00:00 | 4586 | 5154 | 568 | 0 |
| 17:00:00 | 2112 | 4966 | 2853 | 0 |
| 18:00:00 | 268 | 4672 | 4404 | 0 |
| 19:00:00 | 16 | 4749 | 4733 | 0 |
| 20:00:00 | 0 | 5139 | 5139 | 0 |
| 21:00:00 | 0 | 5145 | 5145 | 0 |
| 22:00:00 | 0 | 5139 | 5139 | 0 |
| 23:00:00 | 0 | 5363 | 5363 | 0 |

Na tabela 18 pode ser visto o balanço energético presente da produção de um dia médio do ano. Utilizando as equações presentes no modelo matemático é possível calcular a energia excedente a ser armazenada na bateria, e foi definido que a bateria será dimensionada para um dia médio de produção fotovoltaica. Abaixo o cálculo do dimensionamento é explicado:

$$E_{EXC} = \frac{448 + 2745 + 4363 + 4844 + 5116 + 4744 + 3544 + 1824}{8} = 3.454 kWh$$

Chegando nesse resultado agora basta multiplicar pelas horas de produção excedente para definir a energia total a ser armazenada para essa solução.

$$Q = E_{EXC} * H = 27.629 kWh$$

A partir do cálculo da energia a ser armazenada na bateria, agora considera-se as perdas para o dimensionamento real da bateria:

$$Q_{1ano} = \frac{27.629}{(0,9 * 0,975 * 0,94)} = 33.628 kWh$$

Para ser possível armazenar a energia calculada anteriormente é necessária a utilização de 14 sistema de armazenamento de energia com capacidade de 2,5MWh cada um. Na tabela 19 pode ser verificada a energia armazenada no decorrer do projeto.

Tabela 19 Degradação da Bateria - Cenário 5 (Autor)

| 5 x UFV | | | |
|---------|----------------------------|--------------------------------|--|
| Ano | Compra bateria (MWh) | Capacidade da Bateria (MWh) | Necessidade de armazenamento anual (MWh) |
| 0 | 35,00 | 35,00 | 33,67 |
| 1 | | 33,95 | 31,99 |
| 2 | | 32,93 | 30,39 |
| 3 | | 31,94 | 28,87 |
| 4 | | 30,99 | 27,42 |
| 5 | | 30,06 | 26,05 |
| 6 | | 29,15 | 24,75 |
| 7 | | 28,28 | 23,51 |
| 8 | | 27,43 | 22,34 |
| 9 | | 26,61 | 21,22 |
| 10 | | 25,81 | 20,16 |
| 11 | | 25,04 | 19,15 |
| 12 | | 24,28 | 18,19 |
| 13 | | 23,56 | 17,28 |
| 14 | | 22,85 | 16,42 |
| 15 | | 22,16 | 15,60 |
| 16 | | 21,50 | 14,82 |
| 17 | | 20,85 | 14,08 |
| 18 | | 20,23 | 13,37 |
| 19 | | 19,62 | 12,70 |
| 20 | | 19,03 | 12,07 |

A tabela 19 mostra a degradação anual e com o valor definido de 3% ao ano, considerado até conservador, após comparação com ofertas técnico-comerciais de diferentes baterias. Também está representada na mesma tabela a real necessidade de armazenamento calculado, e é considerado uma queda de 5% ao ano, percentual referente à queda anual da produção excedente verificada nos cálculos realizados.

Na tabela 20 pode ser visto a compilação da utilização das equações para todo o decorrer do projeto.

Tabela 20 Análise global - Cenário 5 (Autor)

| 5 x UFV | | | | | |
|---------|------------|---------------|---------------|---------------------|----------------------|
| Ano | UFV (kWh) | DEMANDA (kWh) | Bateria (kWh) | UTE - Bateria (kWh) | Economia Bateria (L) |
| 1 | 26.124.510 | 42.787.508 | 7.580.297 | 20.083.805 | 2.046.680 |
| 2 | 25.973.356 | 43.643.258 | 7.301.324 | 21.002.609 | 1.971.358 |
| 3 | 25.823.086 | 44.516.124 | 7.027.242 | 21.933.972 | 1.897.355 |
| 4 | 25.673.694 | 45.406.446 | 6.759.199 | 22.878.271 | 1.824.984 |
| 5 | 25.525.176 | 46.314.575 | 6.496.765 | 23.835.538 | 1.754.126 |
| 6 | 25.377.525 | 47.240.866 | 6.239.345 | 24.806.576 | 1.684.623 |
| 7 | 25.230.738 | 48.185.684 | 5.987.505 | 25.792.986 | 1.616.626 |
| 8 | 25.084.808 | 49.149.397 | 5.740.866 | 26.794.605 | 1.550.034 |
| 9 | 24.939.731 | 50.132.385 | 5.500.285 | 27.811.759 | 1.485.077 |
| 10 | 24.795.502 | 51.135.033 | 5.263.464 | 28.845.654 | 1.421.135 |
| 11 | 24.652.115 | 52.157.734 | 5.030.977 | 29.897.573 | 1.358.364 |
| 12 | 24.509.566 | 53.200.888 | 4.804.161 | 30.967.112 | 1.297.123 |
| 13 | 24.367.850 | 54.264.906 | 4.582.390 | 32.055.681 | 1.237.245 |
| 14 | 24.226.962 | 55.350.204 | 4.364.266 | 33.164.656 | 1.178.352 |
| 15 | 24.086.896 | 56.457.208 | 4.151.930 | 34.293.126 | 1.121.021 |
| 16 | 23.947.649 | 57.586.353 | 3.945.342 | 35.441.594 | 1.065.242 |
| 17 | 23.809.215 | 58.738.080 | 3.743.920 | 36.610.863 | 1.010.859 |
| 18 | 23.671.589 | 59.912.841 | 3.547.451 | 37.802.907 | 957.812 |
| 19 | 23.534.767 | 61.111.098 | 3.353.941 | 39.019.168 | 905.564 |
| 20 | 23.398.744 | 62.333.320 | 3.203.027 | 40.221.687 | 864.817 |

Na figura 27 foram levados em consideração a média de produção do primeiro ano, ponto a ponto para as 8760 horas. Com a utilização das mesmas equações de balanço energético e do dimensionamento da bateria do capítulo 4 foi possível a obtenção desses dados de geração de energia. Nesse gráfico é considerada a instalação da bateria Saft e suas limitações como a potência de carregamento, e a potência de descarga para efeito de cálculo.

Para o cenário 5 foi necessário restringir a descarga de energia, uma vez que o valor armazenado superava à demanda da cidade de alguns momentos, e dessa forma considerei que a descarga da bateria seria feita de forma gradual para poder escoar de acordo com a demanda da cidade.

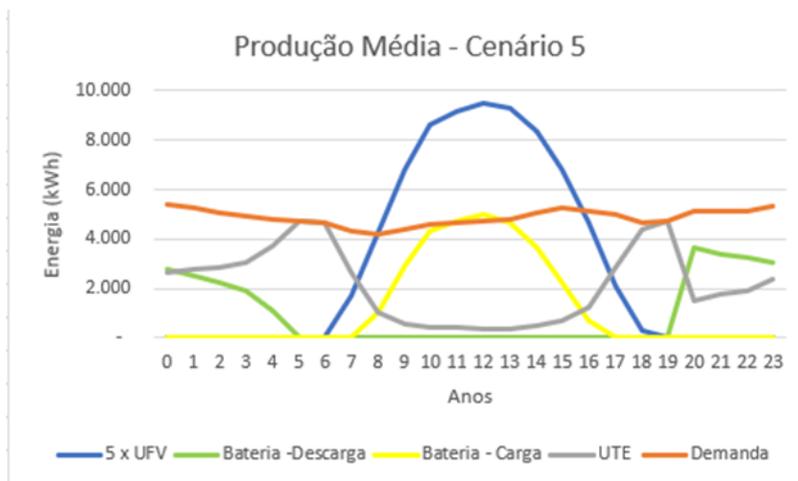


Figura 26 Geração De Energia Média 1º Ano - Cenário 5 (Autor)

Na tabela 21 estão detalhados os custos para a totalidade do projeto, o custo de operação da bateria foi definido como USD 400.000 por ano, tal valor é aproximado e foi retirado de ofertas comerciais de fornecedores de baterias.

Tabela 21 Elaboração dos custos - Cenário 5

| Anos | Redução no consumo Bateria (L) | Economia gerada pela bateria (R\$) | Opex Bateria (R\$) |
|------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.046.680 | R\$ 7.777.385 | R\$ 400.000 |
| 2 | 1.971.358 | R\$ 7.640.982 | R\$ 416.000 |
| 3 | 1.897.355 | R\$ 7.501.232 | R\$ 432.640 |
| 4 | 1.824.984 | R\$ 7.359.412 | R\$ 449.946 |
| 5 | 1.754.126 | R\$ 7.215.147 | R\$ 467.943 |
| 6 | 1.684.623 | R\$ 7.067.849 | R\$ 486.661 |
| 7 | 1.616.626 | R\$ 6.918.219 | R\$ 506.128 |
| 8 | 1.550.034 | R\$ 6.765.907 | R\$ 526.373 |
| 9 | 1.485.077 | R\$ 6.612.016 | R\$ 547.428 |
| 10 | 1.421.135 | R\$ 6.453.875 | R\$ 569.325 |
| 11 | 1.358.364 | R\$ 6.292.184 | R\$ 592.098 |
| 12 | 1.297.123 | R\$ 6.128.678 | R\$ 615.782 |
| 13 | 1.237.245 | R\$ 5.962.679 | R\$ 640.413 |
| 14 | 1.178.352 | R\$ 5.792.430 | R\$ 666.029 |
| 15 | 1.121.021 | R\$ 5.620.821 | R\$ 692.671 |
| 16 | 1.065.242 | R\$ 5.447.969 | R\$ 720.377 |
| 17 | 1.010.859 | R\$ 5.273.230 | R\$ 749.192 |
| 18 | 957.812 | R\$ 5.096.437 | R\$ 779.160 |
| 19 | 905.564 | R\$ 4.914.801 | R\$ 810.327 |
| 20 | 864.817 | R\$ 4.787.527 | R\$ 842.740 |

O fluxo de caixa do projeto para o cenário 5 também foi calculado, para o mesmo foi considerada uma inflação de 4% ao ano. O investimento inicial do projeto foi calculado a partir da relação de USD 400.000 por MWh com outro valor adicional de R\$

200.000 referente aos custos de instalação por container. Valor que totalizou um investimento inicial de R\$ 60.200.000, para um dólar com cotação de R\$ 4,10.

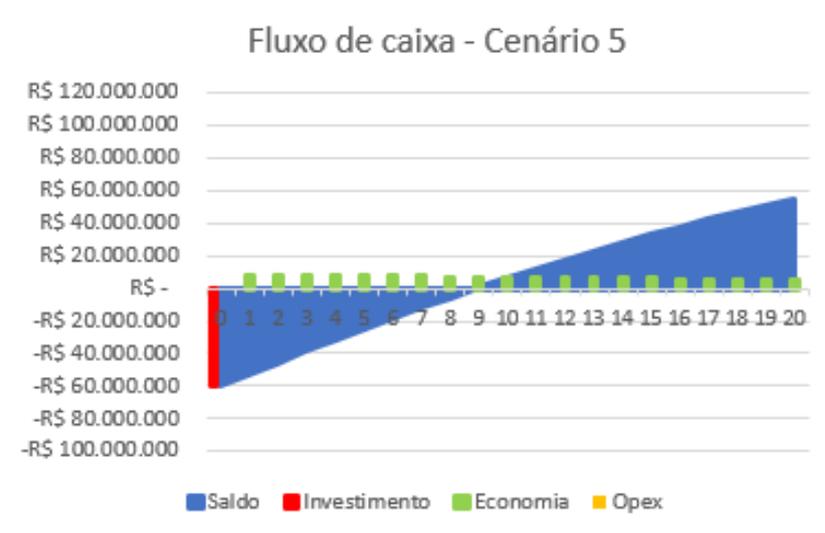


Figura 27 Fluxo de Caixa – Cenário 5 (Autor)

Como pode ser visto na figura 28, o investimento inicial é pago em 9 anos de duração do projeto. Outro indicativo financeiro, o VPL também foi calculado.

$$VPL = 496.561$$

O VPL do projeto com um custo de capital de 8% é positivo, ou seja, o investimento no projeto em tais condições é rentável. A TIR do projeto é de 8,12 % superior ao custo de capital. Com as condições presentes pode-se afirmar que o projeto é viável financeiramente.

6.5 Comparação entre os cenários

O objetivo do estudo é quantificar o impacto da inserção das baterias na usina do Oiapoque, e para isso é necessário analisar a redução no consumo do diesel que o sistema de armazenamento irá gerar. Tanto o impacto financeiro, como o impacto ambiental gerado pela bateria vai variar proporcionalmente à redução do consumo de diesel que a mesma trará para a usina. O impacto financeiro já foi ilustrado anteriormente para cada cenário, agora será explicitado uma comparação a redução em litros de óleo diesel entre os cenários na figura 29.

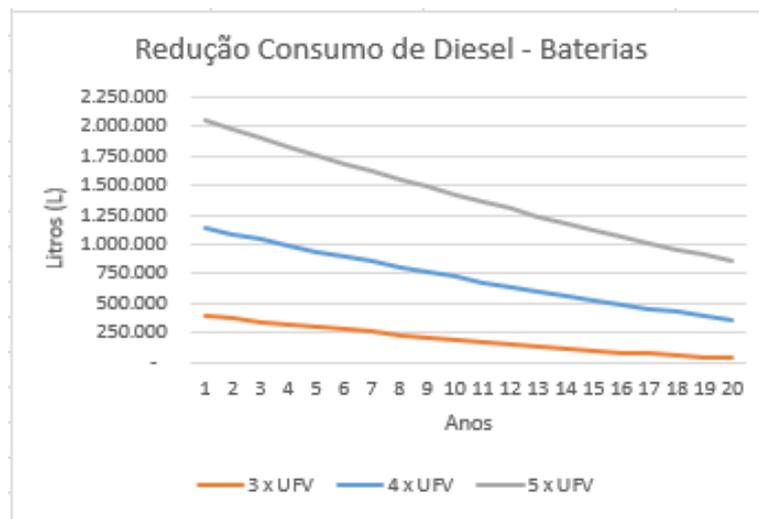


Figura 28 Comparação redução causada pelas baterias (Autor)

A figura 29 justifica o porque do cenário 5 possuir um desempenho financeiro superior aos demais. E isso deriva da maior redução do consumo do óleo diesel ao longo do projeto.

Já na figura 30 pode se quantificar o impacto ambiental ao longo do projeto para cada cenário. Foi considerada a relação de que a cada litro de óleo diesel seriam emitidos 2,93kg de CO₂ na atmosfera (EPE, 2004).

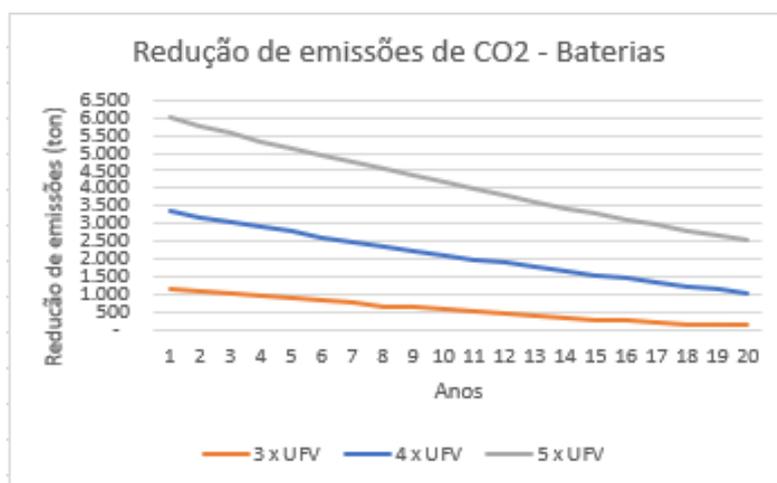


Figura 29 Comparativo da Redução de Emissões

Na tabela 22 pode ser vista a total economia em litros de óleo diesel e de toneladas de CO₂ que deixaram de ser emitidas.

Tabela 22 Redução Ao Longo do Projeto (Autor)

| | 3 x UFV | 4 x UFV | 5 x UFV |
|--------------------------|-----------|------------|------------|
| Redução Total Diesel (L) | 3.863.165 | 14.374.259 | 28.248.398 |
| Redução Total CO2 (Ton) | 11.322 | 42.117 | 82.768 |

6.6 Proposta de melhorias

Nesse espaço do trabalho de conclusão de curso estudo cenários realistas que poderiam tornar o investimento rentável financeiramente, porém sem alterar nenhuma característica técnica do projeto.

- 1º opção – Aumento no custo do diesel

Algumas premissas adotadas no trabalho impactam mais do que outras para o estudo da viabilidade econômica do projeto. Dentre elas as que mais impactam no projeto são:

- Preço de compra do óleo diesel (R\$ 3,80)
- Variação anual do preço do óleo diesel (2%)
- Aumento percentual no consumo da cidade (2%)

Desses parâmetros assumi razoável a alteração de apenas 1, o preço de compra do óleo diesel, uma vez que os outros envolvem fatores externos e que não mudariam muito de um projeto para outro. Alterando o valor de R\$ 3,80 o litro do óleo diesel no primeiro ano, valor obtido com isenção pelo CCC (inserir referência), para 4,15 já trabalharemos com o VPL positivo, o que significa que o investimento seria rentável financeiramente.

Tal alteração apenas supõe que não seria obtido um benefício fiscal e isso parece ser razoável se estivermos pensando em um projeto semelhante. Abaixo segue um fluxo de caixa para o projeto no cenário 4 com o preço do diesel estipulado em R\$ 4,15.

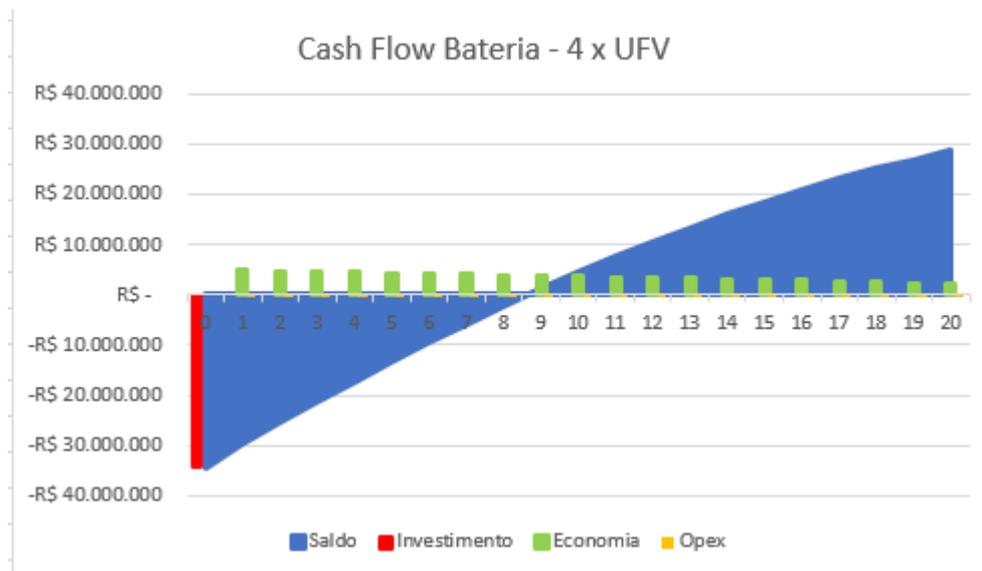


Figura 30 Fluxo de Caixa R\$ 4,15 - Cenário 4

O investimento inicial da bateria para o cenário 4 seria pago no 9º ano do projeto, e o foi verificado que com esse acréscimo de R\$ 0,35 no custo do diesel o VPL se tornou positivo, e a TIR também superou o valor do custo de Capital.

$$VPL = 122.850$$

$$TIR = 8,1\%$$

Dessa forma pode-se aferir que o investimento é rentável uma vez que o VPL é positivo com um custo de capital de 8% e a TIR é superior a esse mesmo custo de capital.

2º opção – Adiamento do investimento

Levando em conta o adiamento do investimento apostando em uma queda no preço da bateria de lítio, que é uma hipótese bem razoável, uma vez que o valor desse produto reduziu consideravelmente nos últimos anos. (BLOOMBERG, 2019). Na figura 31 temos um fluxo de caixa para o cenário 4 com o atraso de 1 ano na implementação das baterias no site. E também considerando a queda de 5% ao ano no custo da bateria.

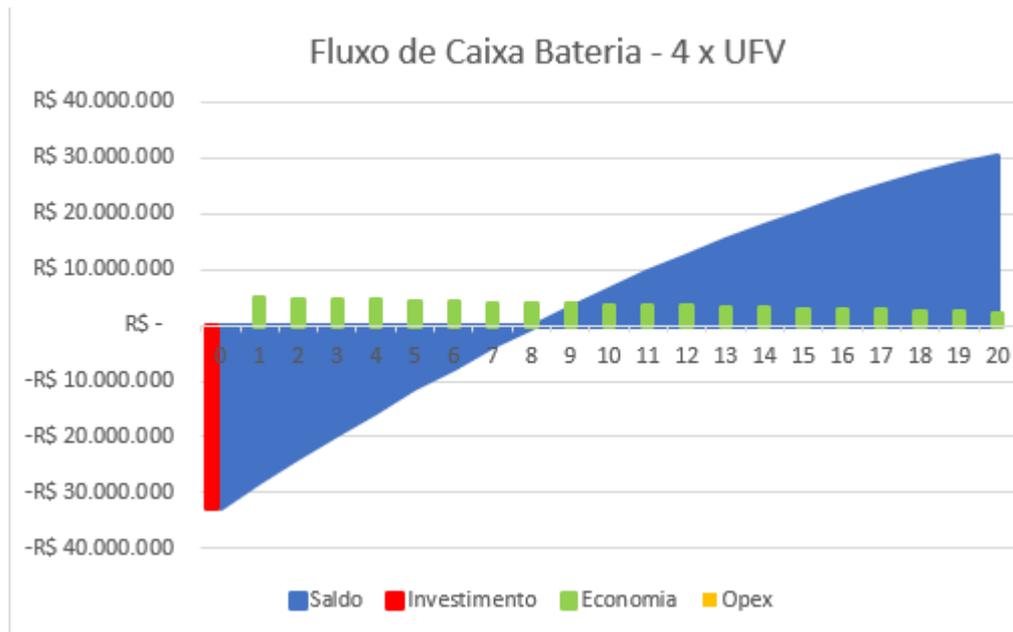


Figura 31 Fluxo de Caixa atraso de 1 ano - Cenário 4

O investimento inicial do projeto é totalmente retornado até o 8º ano de duração do projeto. O VPL verificado do projeto é positivo com o custo de capital de 8%. Também, é verificada uma TIR superior à esse mesmo custo de capital.

$$VPL = 1.922.850$$

$$TIR = 8,93\%$$

Foi verificado que projeto é viável financeiramente para o cenário 4 após com o adiamento da construção em 1 ano.

7. Conclusão

Conforme foi exposto nos resultados desse estudo de final de curso, do ponto de vista técnico o projeto é viável. No mercado já existem baterias que atendem os requisitos do projeto e performam de forma satisfatória, utilizo como exemplo a bateria de íon de lítio que foi objeto de estudo nesse trabalho.

Economicamente o investimento na bateria se mostrou viável para o cenário 5. O qual possui aproximadamente 20 MWp. Nesse cenário o investimento inicial chegou a

ter o payback atingido em 9 anos de projeto, e a economia gerada foi suficiente para gerar um superávit ao levar em consideração o $VPL > 0$.

Porém, para os demais cenários a aplicação da bateria com essa funcionalidade não é viável para os cenários 3 e 4. O cenário 3 possui pouca produção excedente o que dificulta muito esse projeto ser viável financeiramente.

Já o cenário 4 pode vir a ser viável economicamente com a adoção das premissas que foram expostas em propostas de melhorias do projeto. Se o preço do óleo diesel fosse superior a R\$ 4,15 por litro, o que é realista uma vez que hoje na usina é pago R\$ 3,80 com isenções da CCC (INESC, 2018). Ou se o investimento for atrasado em pelo menos 1 ano com uma taxa de 5% de desconto ao ano no custo da bateria, o projeto também seria viável financeiramente.

7.1 Próximos passos

A abordagem dada nesse trabalho de fim de curso não levou em consideração alguns aspectos técnicos devido à complexidade e diferentes campos de estudo que o projeto proposto envolve. Tais como: a variação do consumo específico da usina térmica, a variação da potência injetada na bateria em função do estado de carga da bateria. Porém, o trabalho tomaria uma complexidade que prejudicaria a conclusão para o prazo estipulado.

Dentre as propostas para os cenários futuros seria muito interessante estudar a utilização da bateria para otimizar o funcionamento da UTE, de forma que menos máquinas precisem estar ligadas e a bateria serviria também de backup para o gerador à diesel.

Estudar a influência do estado de carga (SOC) para cada hora do projeto, dessa forma teríamos o conhecimento exato da potência a ser carregada e descarregada em função do percentual de carga já inserido na bateria.

Realizar um estudo com a futura implantação de novas usinas geradoras de energia, uma vez que o consumo da cidade seguirá aumentando, e a produção da usina não acompanhará esse ritmo, o que reduziria muito o potencial de armazenamento de energia das baterias.

8. Referências

ALENCAR, C. A. D.; RAFAEL, S.; URBANETZ, J. Estudo da Complementariedade da Geração de Energia Entre as Fontes Solar e Hidráulica. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, Abril 2018.

ANEEL. **Nota técnica 045/2008 SRG/ANEEL**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2008.

BLOOMBERG. A Behind Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. **BloombergNEF**, 2019. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>>. Acesso em: 24 Novembro 2019.

BRAGA, R. **Fundamentos e técnicos de administração financeira**. São Paulo: Atlas, 2011.

CRESESB. Centro de Referência Para as Energias Solar e Eólicas Sergio de S. Brito. **Cresesb.Cepel**, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>. Acesso em: 22 Novembro 2019.

EDUCA MAIS BRASIL. Usina Termelétrica. **Educa mais Brasil**, 2017. Disponível em: <<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/fisica/usina-termoeletrica>>. Acesso em: 23 Novembro 2019.

EPE. **Potencial de Redução De emissões de CO2 Em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis**. Empresa de Pesquisa Energética. [S.l.]. 2004.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 2018.

EPE. **Projeções dos Preços dos Combustíveis Líquidos para o Atendimento do Sistema Isolado 2020**. Empresa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro. 2019.

EPE. **Resenha Mensal EPE Setembro de 2019**. Empresa de Pesquisa Energética. [S.l.]. 2019.

ESWF. **Growing the Battery Storage Market 2019**. Energy Storage World Forum. [S.l.]. 2019.

GITMAN, L. J. **Princípios da administração financeira**. São Paulo: Pearson, 2010.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades IBGE**, 2019. Disponível em:

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ap/oiapoque/pesquisa/23/25207?tipo=ranking>>.

Acesso em: 24 Novembro 2019.

INESC. **Subsídios Aos Combustíveis Fósseis No Brasil**. Instituto de Estudos Socioeconômicos. [S.l.]. 2018.

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. [S.l.]. 2006.

INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar (2ª Edição)**. [S.l.]. 2017.

IRENA. International Renewable Energy Agency. **irena.org**, 2019. Disponível em: <<https://www.irena.org/costs>>. Acesso em: 24 Novembro 2019.

IRENA. **Utility-Scale Batteries Innovation Landscape Brief**. IRENA. [S.l.]. 2019.

LE MOS, F. F. M. J. **Avaliação técnica e econômica para armazenamento de energia em usinas fotovoltaicas de capacidade instalada reduzida**. Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica Departamento de Engenharia Mecânica . 2017.

NRECA, COBANK, NRTC, NRUCFC. **Battery Storage Overview**. [S.l.]. 2019.

SAFT. **Lithium-ion battery life**. Saft. Bagnolet. 2014.

SAGE, E. AC vs DC solar battery coupling: what you need to know". **News Energy Sage**, 2019. Disponível em: <<https://news.energysage.com/ac-vs-dc-solar-battery-coupling-what-you-need-to-know/>>. Acesso em: 22 Novembro 2019.

SOLAR BRASIL. Solar Brasil. **Solar Brasil**, 2014. Disponível em: <<https://www.solarbrasil.com.br/blog/conceitos-de-energia-solar-fotovoltaica-como-a-radiacao-solar-varia-ao-longo-do-dia/>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

TAVARES, J. P. N. Características da Climatologia de Macapá - AP. **Caminhos de Geografia**, 2014.

VILLALVA, M. G. **Curso de Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e aplicações**. [S.l.]: Erica/Saraiva, 2018.

VOLTALIA. **Investment Proposal**. Voltalia Energia do Brasil. Rio de Janeiro. 2017.

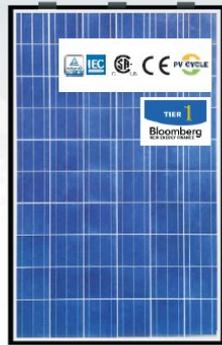
WILKE, H.; SILVA LORA, E. E.; VENTURINI, O. J. Redução de Consumo de Diesel Em Usinar Termelétricas Em sistemas Isolados Utilizando ORC e Energia Elétrica Fotovoltaica. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Gramado, Abril 2018.

Anexo A – Manual técnico BYD



BYD P6C-30-DG Series-3BB

245W 250W 255W 260W 265W



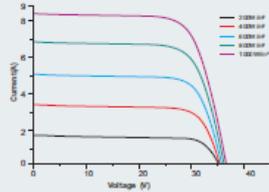
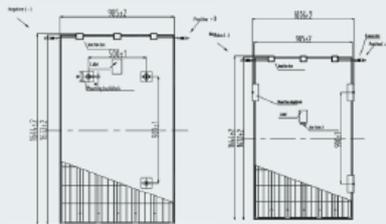
BYD 430 PV Game Changer

- 4 - Longer service time up to 40 years.
- 3 - The minimal annual power degradation could reach 0.3%
- 0 - PID free & snail cracks free.

2nd General BYD Double Glass Module

- More Profitable**
 - The minimal annual power degradation could reach 0.3%
 - Higher return on investment
 - Longer service time up to 40 years
 - Easier installation design
 - Higher system voltage
 - Lower balance of system cost
- More Durable**
 - Unique design and material to minimize micro-cracks
 - Longer service time up to 40 years
- More Efficient**
 - No UV cut off
 - Higher power output
- More Reliable**
 - PID free & snail cracks free.
 - Stable encapsulating material

245W 250W 255W 260W 265W



Mechanical Specifications

| | |
|--------------------------|---|
| Cell | Polycrystalline Silicon solar cells 156mm * 156mm / 6 inch |
| No. of Cells | 60 (6 * 10) pieces |
| Dimension of Module | 1644mm*989mm*29 mm / 64.71inch*38.93inch*1.14inch |
| Weight | 27.5kg / 60.63 lbs |
| Front Glass | 3.2 mm tempered glass with AR Coating |
| Junction Box | PV-ZH011C-1/PV-TSQB-13/PVZH-011B-5 |
| Plug Connector | IP67 |
| Bypass-Diodes | 3 pieces |
| Type of Connector | PV-Z-002/FPV-TS01/PV-Z-002B |
| Cable Section Area | 4 mm ² / 0.0062 Sq in |
| Cable Length | 2 * 400 mm / 2 * 15.7 inch |
| Max. Fuse Current Rating | 20A |

Temperature Coefficients

| | |
|---|--------------|
| Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) | 43 °C ± 2 °C |
| Short-Circuit Current Temperature Coefficient | 0.066%/°C |
| Open-Circuit Voltage Temperature Coefficient | -0.30 %/°C |
| Peak Power Temperature Coefficient | -0.37 %/°C |

Package Information

| | |
|--------------------|--------|
| Package | 40' HC |
| Pcs / Pallet | 34 |
| Pallet / Container | 24 |
| Pcs / Container | 816 |

BYD P6C-30-DG Series Electrical Specification

| Item | Module | BYD 245P6C-30-DG | BYD 250P6C-30-DG | BYD 255P6C-30-DG | BYD 260P6C-30-DG | BYD 265P6C-30-DG |
|-------------------------|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Voc | | 37.45 V | 37.76 V | 38.07 V | 38.38 V | 38.69 V |
| Vmp | | 29.85 V | 30.13 V | 30.40 V | 30.67 V | 30.93 V |
| Isc | | 8.73A | 8.81A | 8.89 A | 8.97 A | 9.05 A |
| Imp | | 8.21 A | 8.30A | 8.39 A | 8.48A | 8.57A |
| Pmax | | 245 Wp | 250 Wp | 255 Wp | 260 Wp | 265 Wp |
| Module Efficiency | | 15.13% | 15.44% | 15.75% | 16.06% | 16.4% |
| Operating Temperature | | -40°C~85°C | | | | |
| Max.Fuse Current Rating | | 20 A | | | | |
| Maximum System Voltage | | 1000VDC/1500VDC | | | | |
| Power Tolerance | | 0~5W | | | | |
| Application Classes | | Class A | | | | |

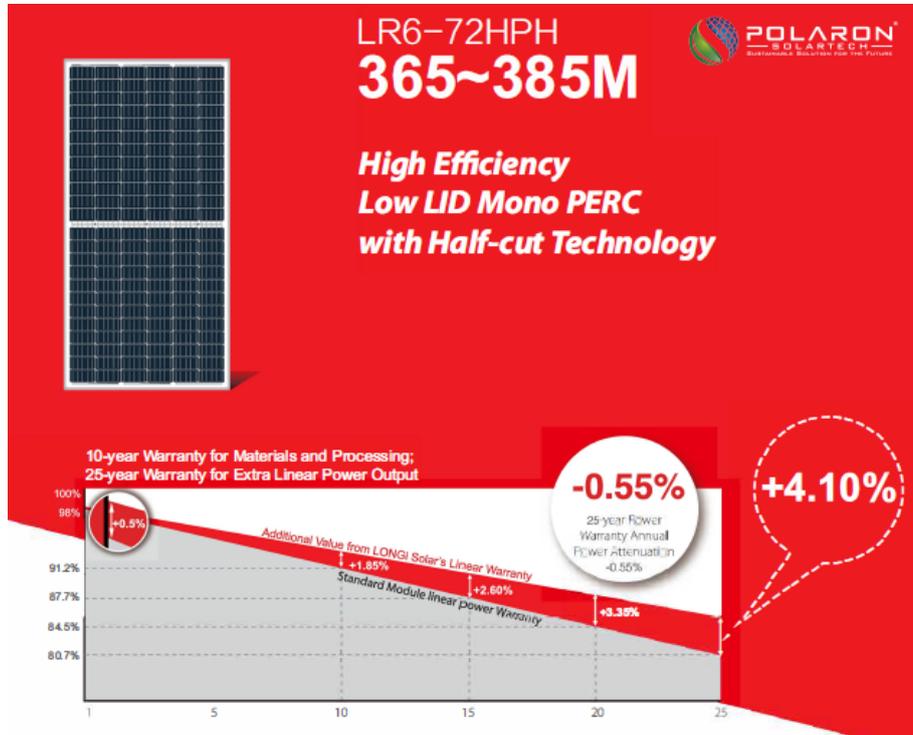
STC: 1000W/m², Module Temperature 25°C, AM1.5 Air. Air density reduced to 4.5% at 2000W/m²

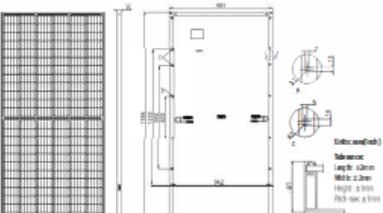
Anexo B – Manual Técnico Schneider

Conext CL series

| Device short name | CL20000 E | CL25000 E |
|---|---|---|
| Electrical specifications | | |
| Input (DC) | | |
| Full power MPPT voltage range | 350 - 800 V | 430 - 800 V |
| Operating voltage range at nominal AC voltage | 250 - 1000 V | 250 - 1000 V |
| Max. input voltage, open circuit | 1000 V | 1000 V |
| Number of MPPT / strings per MPPT* | 2 / 4 | 2 / 4 |
| Max. array short circuit current per MPPT | 40.0 A | 40.0 A |
| Nominal DC input power | 21.5 kW | 26.5 kW |
| Max. DC input power per MPPT** | 12.9 kW | 15.9 kW |
| DC connection (in the wiring box) | Base model: spring cage clamp connector Essential model and optimum model: fuse holder | Base model: spring cage clamp connector Essential model and optimum model: fuse holder |
| Output (AC) | | |
| Rated output power (PF=1) | 20.0 kW | 25.0 kW |
| Max. apparent power | 20.0 kVA | 25.0 kVA |
| Nominal output voltage | 230 / 400 V | 230 / 400 V |
| AC voltage range | 184 - 276 V / 319-478 V | 184 - 276 V / 319-478 V |
| Frequency | 50 / 60 Hz | 50 / 60 Hz |
| Frequency range (adjustable) | 50 +/- 3 Hz, 60 +/- 3Hz | 50 +/- 3 Hz, 60 +/- 3Hz |
| Max. output current | 30.0 A | 37.0 A |
| Nominal continuous output current | 29.0 A | 36.1 A |
| Total harmonic distortion | < 3 % | < 3 % |
| Power factor (adjustable) | 0.8 lead to 0.8 lag | 0.8 lead to 0.8 lag |
| AC connection (in the wiring box) | spring cage clamp connector | spring cage clamp connector |
| Efficiency | | |
| Peak | 98.3 % | 98.3 % |
| European | 98.0 % | 98.0 % |
| General specifications | | |
| Power consumption at night time | < 3.0 W | < 3.0 W |
| Enclosure rating | IP65 (electronics) | IP65 (electronics) |
| Cooling | Fan cooled | Fan cooled |
| Inverter weight | 54 kg (119 lb) | 54 kg (119 lb) |
| Wiring box weight | 15 kg (33 lb) | 15 kg (33 lb) |
| Inverter dimensions (H x W x D) | 71.4 x 67.4 x 26.8 cm (28.1 x 26.5 x 10.5 in) | 71.4 x 67.4 x 26.8 cm (28.1 x 26.5 x 10.5 in) |
| Wiring box dimensions (H x W x D) | 36.1 x 67.4 x 26.8 cm (14.2 x 26.5 x 10.5 in) | 36.1 x 67.4 x 26.8 cm (14.2 x 26.5 x 10.5 in) |
| Ambient air temperature for operation | -25 to 60°C (-13 to 140°F) | -25 to 60°C (-13 to 140°F) |
| Max. operating altitude without derating | 2000 m (6560 ft) | 2000 m (6560 ft) |
| Relative humidity % | 4...100 condensing | 4...100 condensing |
| Noise emission (at 1 m distance) | < 58 dBA | < 58 dBA |

Anexo C - Manual Técnico Longi



| Design (mm) | Mechanical Parameters | Operating Parameters |
|---|---|---|
|  | <p>Cell Orientation: 144 (6x24)</p> <p>Junction Box IP67, three diodes</p> <p>Output Cable: 4m², 300mm in length</p> <p>Weight: 23.5kg</p> <p>Dimension: 1996x991x40mm</p> <p>Packaging: 26pcs per pallet 572pcs per container</p> | <p>Operational Temperature: -40°C ~ +85°C</p> <p>Power Output Tolerance: 0 ~ +5 W</p> <p>Maximum System Voltage: DC1500V (IEC)</p> <p>Maximum Series Fuse Rating: 20A</p> <p>Nominal Operating Cell Temperature: 45±2°C</p> <p>Application Class: Class A</p> |

| Electrical Characteristics | | Test uncertainty for Pmax: ±3% | | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|--|
| Model Number | LR6-72HPH-365M | | LR6-72HPH-370M | | LR6-72HPH-375M | | LR6-72HPH-380M | | LR6-72HPH-385M | | |
| Testing Condition | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | STC | NOCT | |
| Maximum Power (Pmax/W) | 365 | 270.4 | 370 | 274.1 | 375 | 277.8 | 380 | 281.5 | 385 | 285.2 | |
| Open Circuit Voltage (Voc/V) | 48.4 | 45.2 | 48.6 | 45.4 | 48.8 | 45.6 | 49.0 | 45.7 | 49.2 | 46.0 | |
| Short Circuit Current (Isc/A) | 9.71 | 7.82 | 9.79 | 7.89 | 9.87 | 7.95 | 9.96 | 8.02 | 10.03 | 8.09 | |
| Voltage at Maximum Power (Vmp/V) | 40.0 | 36.9 | 40.2 | 37.1 | 40.4 | 37.3 | 40.6 | 37.5 | 40.8 | 37.7 | |
| Current at Maximum Power (Imp/A) | 9.13 | 7.32 | 9.21 | 7.38 | 9.28 | 7.44 | 9.36 | 7.50 | 9.43 | 7.57 | |
| Module Efficiency(%) | 18.5 | | 18.7 | | 19.0 | | 19.2 | | 19.5 | | |
| STC (Standard Testing Conditions): Irradiance 1000W/m ² , Cell Temperature 25°C, Spectra at AM1.5 | | | | | | | | | | | |
| NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): Irradiance 800W/m ² , Ambient Temperature 20°C, Spectra at AM1.5, Wind at 1m/s | | | | | | | | | | | |

Anexo E – Manual técnico Saft

