

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
LAÉRCIO ANTÔNIO PIVA**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA
IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA INTEGRADO DE
COGERAÇÃO A GÁS NATURAL E
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM
HOSPITAL DE JUNDIAÍ, SP**

SÃO PAULO

2017

LAÉRCIO ANTÔNIO PIVA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA PARA
IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA INTEGRADO DE
COGERAÇÃO A GÁS NATURAL E
GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM
HOSPITAL DE JUNDIAÍ, SP**

Monografia apresentada em 30/08/2017,
à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,
para obtenção de título de Especialista.

Área de concentração:
Energias Renováveis, Geração Distribuída e
Eficiência Energética

Orientador: Prof. Msc. Ronaldo Andreos

SÃO PAULO

2017

Piva, Laércio Antônio

Análise de viabilidade técnico-econômica para implantação de sistema integrado de cogeração a gás natural e geração fotovoltaica em hospital de Jundiaí, SP

Orientador: Andreos, Ronaldo – São Paulo, SP, 2017

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia

1. Sistema Integrado de geração de energia
2. Cogeração a gás natural
3. Geração fotovoltaica
4. Geração distribuída
5. Viabilidade técnico-econômica
6. Título

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Msc. Ronaldo Andreos com valiosas informações supridas durante o curso e na coordenação deste trabalho;

Aos demais professores, pela atualização e complementação dos conhecimentos para a especialidade;

Aos amigos da turma, pela troca de conhecimentos e experiências ao longo do período letivo;

À minha família, sempre entendendo as minhas prioridades, e ao meu filho, Pedro Paulo, profissional da área de comunicação, sempre disposto a colaborar.

RESUMO

Piva L. A., **Análise de viabilidade técnico-econômica para implantação de sistema integrado de cogeração a gás natural e geração fotovoltaica em hospital de Jundiaí, SP**, 2017, para obtenção de título de especialista em energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética – PECE, USP

O custo e disponibilidade de energia elétrica em nosso país é fortemente dependente do nível de água acumulado nas usinas hidrelétricas, em um cenário com histórico de incertezas nas tarifas e no suprimento de energia elétrica.

Neste panorama, e aliado a dependência do hospital com a rede de distribuição de eletricidade, a motivação foi entender as demandas de energia elétrica e térmica e propor alternativas para redução dos custos, limitar os efeitos das oscilações na tarifa e tornar o sistema energético mais confiável.

Durante o processo de avaliação das instalações e demandas do hospital, foi constatado que os sistemas de ar condicionado são compostos por unidades elétricas autônomas e a água quente demandada é suprida por equipamentos elétricos instalados nos pontos de uso, tais como chuveiros e aquecedores.

De início, foi possível estimar que a utilização do calor rejeitado da cogeração para geração de frio não se mostrava uma alternativa viável, devido ao elevado investimento envolvido em uma eventual mudança da concepção do ar condicionado para utilização de água gelada. Partindo desta premissa, incluímos como um dos cenários para estudo a concepção de unidade de cogeração com menor potência limitada a demanda de água quente, e consequentemente reduzir a geração de eletricidade.

Como a conta de energia elétrica é o grande vilão do hospital, seria necessário buscar alguma alternativa viável para incrementar a geração de eletricidade. Desta feita incluímos como uma solução a ser avaliada a integração das tecnologias de cogeração com a geração fotovoltaica, objetivando equilibrar a geração e demanda de energia elétrica.

Com o estudo e análises comparativas envolvendo cogeração isolada de menor e de maior porte, comprovamos que combinar as tecnologias – cogeração e geração fotovoltaica se mostrou uma boa opção, com maior fator de utilização do combustível na cogeração, melhores índices de viabilidade e menor custo da energia elétrica gerada ao longo de 15 anos, quando comparado com a cogeração convencional.

E por final, em face dos índices de viabilidades obtidos não serem nada atrativos, *payback* acima de oito anos, o estudo simula e avalia a influência de alguns *upsides* econômicos, e mensura o impacto ambiental com a implantação da cogeração e geração fotovoltaica no hospital.

Palavras chaves: cogeração a gás natural, geração fotovoltaica, sistema integrado de geração de energia, viabilidade técnico-econômica

ABSTRACT

Piva L. A., technical - economic study of natural gas cogeneration – photovoltaic integration systems. 2017, renewable energy specialist, PECE, USP

The country energy cost is strongly dependent of the water level accumulated at the hydroelectric plants, and at this scenario, the objective of this study was to understand the electric and thermal energy demands of the hospital and evaluate alternatives to reduce energy costs, to limit the effects of electric energy tariff changes and to improve the reliability of the hospital energy system.

During the process of the hospital facilities evaluation, I became aware that the air conditioning systems are composed by stand-alone electrical units, and, the hot water demand is being generated through electrical equipment installed at points of use, such as showers and heaters.

For a better cogeneration energy balance, the air conditioning system requires a complete design change, to consume chilled water from the cogeneration rejected heat. The updating of air conditioning is not a priority of the hospital, as well as impacting the viability of the project.

At the light of these assumptions, we limited the cogeneration to the rejected heat necessary to produce the hospital hot water demand. The plant was designed as a topping cycle, to generate, as the main product, electricity and hot water, as secondary.

Considering that electrical energy is the great villain of the hospital and the limitations of the installation, we have chosen a solution integrating the cogeneration with natural gas and photovoltaic generation.

This solution combines natural gas cogeneration and photovoltaic system, making possible to increase the hospital electricity compensation. And finally, we evaluated some economic upsides, as well as the environmental impacts with the local generation.

Keywords: natural gas cogeneration, photovoltaic generation, integrated energy generation system, technical-economic viability;

Listagem de Figuras

Figura 3.1 - Esquemático de transformação de combustível em EE	5
Figura 3.2 - Fluxograma típico da cogeração	6
Figura 3.3 - <i>Bottoming cycle</i>	11
Figura 3.4 - <i>Topping cycle</i>	11
Figura 3.5 - Infraestrutura de gasoduto de transporte do Brasil	14
Figura 3.6 - Ciclo Brayton	15
Figura 3.7 - Cogeração Heineken, Jacareí, SP	16
Figura 3.8 - Ciclo Rankine	16
Figura 3.9 - Ciclo combinado	17
Figura 3.10 - Microturbina	18
Figura 3.11 - Cogeração com aplicação de microturbinas	19
Figura 3.12 - Célula a combustível unitária	19
Figura 3.13 - Processos do motor quatro tempos	24
Figura 3.14 - Cogeração típica	25
Figura 3.15 - Balanço energético	28
Figura 4.1 - Evolução da capacidade FV instalada mundial	30
Figura 4.2 - Evolução mundial dos custos de instalação FV residencial	31
Figura 4.3 - Unidades consumidoras de geração fotovoltaica	32
Figura 4.4 - Célula fotovoltaica: silício	34
Figura 4.5 - Processo de fabricação do silício	35
Figura 4.6 - Tipos de painéis fotovoltaicos: silício	36
Figura 4.7 - Curva típica da célula fotovoltaica (I-V)	37
Figura 4.8 - Curva típica da célula fotovoltaica (P-V)	37
Figura 4.9 - Influência da temperatura na curva (I-V) da célula FV	38
Figura 4.10 - Influência da radiação solar na curva (I-V) da célula FV	38
Figura 4.11 - Orientação dos painéis FV	39
Figura 4.12 - Sistema de geração FV OFF-GRID	40
Figura 4.13 - Sistema de geração FV para bombeamento de água	41
Figura 4.14 - Diagrama de SFCR típico	42
Figura 4.15 - Diagrama multifilar de SFCR	42
Figura 4.16 - Sistema de geração de energia híbrido	43
Figura 5.1 - Fluxos físicos e comerciais da CCEE	44
Figura 6.1 - Vista aérea do hospital em estudo.....	51
Figura 6.2 - Gráfico de demanda média diária de EE do hospital.....	52
Figura 6.3 - Gráfico de consumo de EE do hospital.....	53
Figura 6.4 - Demanda de água quente do hospital	54
Figura 6.5 - Diagrama da radiação diária gerador FV: exposição 1	59
Figura 6.6 - Diagrama da radiação diária gerador FV: exposição 2	60
Figura 6.7 - Plano do gerador do sistema FV	63
Figura 6.8 - Diagrama elétrico gerador do SFCR: cenário 1.....	64
Figura 6.9 - Gráfico da EE produzida SFCR do cenário 1 x consumo	65
Figura 6.10 - Motor Caterpillar de 143 KWe	67
Figura 6.11 - Diagrama do processo: cenário 2	68
Figura 6.12 - Diagrama do processo: cenário 3	72
Figura 6.13 - Diagrama do processo: cenário 4	77
Figura 6.14 - Gráfico payback simples: comparação entre cenários.....	81

Figura 6.15 - Gráfico custo da EE: comparação entre cenários.....	81
Figura 6.16 - Gráfico: custo das tecnologias e adequações	82
Figura 7.1 - Balanço ambiental da solução integrada (cenário 3)	93
Figura 8.1 - Gráficos: índices de viabilidade cenário 3 x <i>upsides</i>	96

Listagem das Tabelas

Tabela 2.1 - Cenários para o estudo de caso.....	4
Tabela 3.1 - Composição química do GN	13
Tabela 3.2 - Fontes, produção e uso de célula a combustível	21
Tabela 3.3 - Índices para ponderação da qualificação da cogeração	27
Tabela 4.1 - Comparação entre painéis FV de silício	36
Tabela 4.2 - Ângulo de inclinação do painel FV x latitude.....	39
Tabela 5.1 - Principais alterações da RN 482	49
Tabela 6.1 - Localização geográfica do hospital em estudo.....	55
Tabela 6.2 - Ganhos ambientais com o gerador fotovoltaico cenário 1.....	58
Tabela 6.3 - Radiação solar no plano horizontal SFCR cenário 1.....	58
Tabela 6.4 - Exposições gerador SFCR cenário 1.....	58
Tabela 6.5 - Radiação solar plano inclinado SFCR cenário 1: exposição 1.	59
Tabela 6.6 - Radiação solar plano inclinado SFCR cenário1: exposição 2.	60
Tabela 6.7 - Características do SFCR cenário 1.....	61
Tabela 6.8 - Características dos módulos FV	61
Tabela 6.9 - Dados técnicos dos inversores do SFCR cenário 1.....	61
Tabela 6.10 - Dados técnicos das strings do SFCR.....	62
Tabela 6.11 - Geração bruta de energia SFCR cenário 1 por exposição	62
Tabela 6.12 - Perdas do SFCR cenário 1.....	63
Tabela 6.13 - Investimento e geração de EE SFCR cenário 1.....	65
Tabela 6.14 - Premissas e retorno do investimento do SFCR	66
Tabela 6.15 - Descrição dos componentes da cogeração cenário 2.....	69
Tabela 6.16 - Balanço energético da cogeração cenário 2.....	70
Tabela 6.17 - Comparação situação atual x solução integrada (cenário 3).	73
Tabela 6.18 - Cálculo da taxa de desconto: metodologia WACC	74
Tabela 6.19 - Planilha financeira para a solução integrada (cenário 3)	75
Tabela 6.20 - Balanço energético da cogeração (cenário 4)	78
Tabela 6.21 – Dados comparativos entre os cenários estudados	80
Tabela 6.22 - Custo das tecnologias x adequações por cenário	82
Tabela 6.23 - <i>Upsides</i> para viabilização da solução integrada (cenário 3)...	84
Tabela 7.1 - Impactos ambientais: redução consumo (SFCR-cenário 3) ...	88
Tabela 7.2 - Impactos ambientais: redução consumo (COGEN-cenário 3)..	91
Tabela 7.3 – Impactos ambientais: queima GN cogeração cenário 3.....	92
Tabela 7.4 – Balanço ambiental para solução integrada (cenário 3)	93

Listagem das Abreviações, Siglas e Termos

AHU - *Air handling unit*
ANEEL - Agência nacional de energia elétrica
ANP - Agência nacional do petróleo
AQ - Água quente
BTU - *British thermal unit*
CCEE - Câmara de Comércio de Energia Elétrica
CA - Corrente alternada
CC - Corrente contínua
CRESESB - Centro de referência para energia solar e eólica Sergio Salvo Brito
CPFL - Companhia paulista de força e luz
Downside – ocorrência desfavorável para a viabilidade do projeto
EE - Energia elétrica
EIA - *Energy Information Administration*
EPE - Empresa de pesquisas energéticas
FC - Fator de carga
FDI - Fator de dimensionamento do inversor
FV - Fotovoltaico
FUE - Fator de utilização de energia
GD - Geração distribuída
GN - Gás natural
IEA - *International Energy Agency*
KVA - Quilo-volt-ampere
MME - Ministério de minas e energia
MCI - Motor de combustão interna
MPPT - *Maximum power point tracking*
OFF-GRID - Sistema fotovoltaico isolado da rede elétrica
ON-GRID - Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica
ONS - Operador nacional do sistema elétrico
OPEP - Organização dos países exportadores de petróleo
PBS - *Payback* simples
PURPA - *Public utility regulatory policies act*
PU - Potência útil
PBD - *Payback* descontado
PRODIST - procedimento de dist. de EE sistema elétrico nacional (ANEEL)
RN - Resolução normativa
SFCR - Sistema fotovoltaico conectado à rede
SIN - Sistema integrado nacional
Solução híbrida - mais de uma tecnologia de geração em um mesmo sistema;
String - Série de módulos fotovoltaicos interligados
TIR - Taxa interna de retorno
Upside - Ocorrência favorável a viabilidade do projeto;
USP - Universidade de São Paulo
VPL - Valor presente líquido
WAAC - weighted average cost of capital

Listagem dos Símbolos

C - Coulomb
H - Hertz
I - Corrente elétrica
Kt – 10^3 toneladas
KW - Quilowatt
KWh - Quilowatt-hora
KWp - Quilowatt-pico
J - Joule
L - Litro
L/min - Litro por minuto
M³ - metro cúbico
MJ – Megajoule
Mtoe – milhões de toneladas equivalentes
MWh - Megawatt-hora
MPa - Megapascal
R\$ - Reais
V - Volts
W - Watt
Wp - Watt-pico / w/m^2 -
 W/m^2 - Watt por metro quadrado
 ρ - Densidade em g/cm^3
 η - rendimento

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Análise da questão	3
3. Estado da arte da cogeração	5
3.1. Processo da cogeração	6
3.2. História da cogeração	6
3.3. Ciclos da cogeração	10
3.4. Combustíveis	12
3.5. Tecnologias aplicadas na cogeração	14
3.6. Processo de qualificação e fator de utilização de energia da cogeração	26
4. Estado da arte da geração FV	30
4.1. Evolução da geração solar fotovoltaica.....	30
4.2. Conceitos do processo para geração solar fotovoltaica.....	32
4.3. Sistemas para geração solar fotovoltaica.....	40
5. Legislação aplicada na geração fotovoltaica e cogeração	44
5.1. Legislação geração fotovoltaica	44
5.2. Legislação cogeração	47
6. Estudo de caso: COGERAÇÃO e SFCR em hospital de pequeno porte.....	50
6.1. Instalações e demandas do hospital	51
6.2. Cenário 1: Concepção do sistema fotovoltaico conectado à rede.....	55
6.3. Cenário 2: Concepção da cogeração a gás natural de 143 KWe	67
6.4. Cenário 3: Concepção da solução integrada (cenário 1 + cenário 2)	71
6.5. Cenário 4: Concepção da cogeração a gás natural de 227 KWe	76
6.6. Comparação dos índices de viabilidade para os cenários estudados	79
6.7. Upsides simulados para solução integrada (cenário 3).....	83
7. Balanço ambiental para a solução integrada (cenário 3)	85
7.1. Impacto ambiental com a redução consumo da rede com o SFCR 107,5 KWp..	86
7.2. Impacto ambiental com a redução consumo da rede com a COGEN 143 KWe..	88
7.3. Impacto ambiental com a queima de GN na COGEN 143 KWe.....	91
7.4. Balanço ambiental para a implantação solução integrada (cenário 3)	93

8. Conclusões	95
Referências bibliográficas	98

1. INTRODUÇÃO

Este estudo de caso tem como meta a implantação de geração de energia distribuída em um hospital da cidade paulista de Jundiaí, por meio da análise das tecnologias de cogeração a gás natural e geração fotovoltaica, com viés técnico e econômico.

O trabalho tem como motivação a avaliação do sistema energético do hospital, seguido de proposta para: redução dos custos com energia, melhorar a confiabilidade do sistema energético e minimizar os impactos dos frequentes aumentos de tarifas de energia elétrica. A unidade é dependente da rede de distribuição de energia elétrica, inclusive utilizando energia elétrica para geração de água quente.

Com a regulamentação da geração distribuída, se tornou viável gerar e consumir a energia em um mesmo local, tanto para pequenos, médios ou grandes consumidores.

Esta alternativa propicia vantagens econômicas e operacionais para o gerador/consumidor e para o administrador de rede de distribuição, assim como a contribuição ambiental local e global.

Até o fim da década de 1990 o Brasil não possuía políticas voltadas ao desenvolvimento e incentivo à geração distribuída, assim como para a utilização de fontes alternativas de energia elétrica, sendo predominante as grandes hidrelétricas. Com a severa estiagem de 2001, que culminou no apagão seguido de racionamento, favoreceu para a mudança de mentalidade e busca de alternativas no segmento industrial, comercial e residencial.

A partir de 2004, quando o termo geração distribuída apareceu na lei 10.848/04, que se refere a geradora conectada à rede de distribuição, colocou de vez a geração no local de consumo como alternativa para compensação da energia elétrica demandada. Pouco mais adiante, o decreto 5.163/04 ajudou as distribuidoras que se opunham a esta modalidade, a aceitar a geração distribuída

como forma para redução de riscos no plano energético da sua área de concessão. A Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL) regulamentou a GD em 2012, através da resolução normativa 482/2012, definindo micro e minigeração como instalações para autoprodução de energia a partir de fontes solar, eólica, hidráulica, biomassa e cogeração qualificada, com capacidade de 100 a 1000 KW.

Já em 2015, a 482 foi aperfeiçoada, por meio da resolução normativa 687/2015, abrindo o caminho para desenvolvimento das tecnologias renováveis e também a melhoria da eficiência energética, assim como a cogeração qualificada em diversos segmentos.

2. ANÁLISE DA QUESTÃO

A estratégia inicial para o hospital em estudo, previa avaliar técnica e economicamente a utilização de tecnologia de cogeração a gás natural, com geração de energia elétrica como produto principal e recuperação da energia térmica em forma de calor rejeitado como secundária.

Entretanto, na fase de levantamento de dados, constatamos que os sistemas de ar condicionado são autônomos, do tipo *split* e *self* elétricos, portanto, não poderiam utilizar o frio da cogeração. E a demanda de água quente é suprida por chuveiros e aquecedores elétricos no ponto de uso.

A mudança da concepção do sistema de ar condicionado para utilizar a água gelada, exigiria um sistema completamente novo. Aliado a amplitude das mudanças e investimentos envolvidos, estes não são prioritários para o hospital. E ainda que houvesse a disponibilidade financeira, o empreendimento seria inviabilizado economicamente.

Partindo destas premissas, restou incluir como opção, limitar a potência da cogeração com a demanda de energia térmica. Para equacionar a elevada conta de energia elétrica, seria também uma boa alternativa estudar a viabilidade de integrar a cogeração com um sistema fotovoltaico, buscando equilibrar a geração com a demanda de energia elétrica.

A tabela a seguir estabelece alguns cenários para estudo, considerando tecnologia de cogeração e geração FV isoladas, assim como a integração destas alternativas.

- Cenários para estudo

A metodologia utilizada teve como objetivo identificar e desafiar algumas possíveis soluções para geração de energia elétrica e térmica para um hospital de pequeno porte, através de cenários com tecnologias isoladas e integradas. Estes cenários serão avaliados e comparados em todas as etapas do estudo de caso.

Cenários para estudo			
Cenário	Descrição	Energia elétrica	Energia térmica
1	Gerador Fotovoltaico limitado a área de telhado	Geração compatível com a área de exposição	Não se aplica
2	Cogeração a gás natural de menor potência , limitada a demanda de água quente	Geração parcial da energia elétrica atualmente consumida	Geração da totalidade da demanda de água quente
3	Geração integrada: cenário 1 + cenário 2	Geração parcial do consumo energia elétrica	Geração e demanda total de água quente
4	Cogeração a gás natural de maior potência , limitada ao consumo de energia elétrica	Geração acima de 90% da energia elétrica consumida	Geração da totalidade da demanda de água quente e parcial de água gelada

Tabela 2.1 – Cenários para estudo

Nota: No final do estudo, serão avaliados os impactos ambientais para o melhor cenário técnico e econômico. Atualmente a totalidade dos insumos energéticos são provenientes da rede elétrica do sistema integrado nacional.

3. ESTADO DA ARTE DA COGERAÇÃO

A forma mais comum de energia em nosso dia a dia é sem dúvida a energia elétrica, com aplicações na indústria, nos comércios e nas nossas residências, o que a torna uma forma nobre da energia. Podemos utilizá-la em aplicações eletromecânicas e na geração de calor.

Tomando a geração da energia elétrica a partir um combustível fóssil, e fazendo uso do fluxograma das transformações, podemos facilmente entender o processo de geração e seus limites.

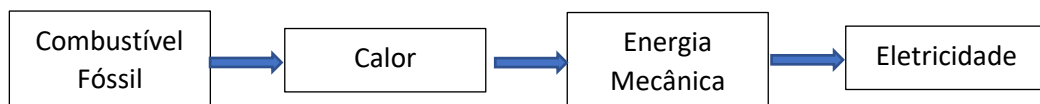


Figura 3.1: Esquemático da transformação do combustível em eletricidade (Silveira, 1994)

A luz dos conceitos das máquinas térmicas apresentados no capítulo 3 do manual de energias renováveis, concebido pelos Professores Simões e Pimenta, é possível dizer que conforme a segunda lei da termodinâmica o rendimento máximo que pode ser obtido com uma máquina térmica está no limite do rendimento de Carnot. Este ciclo não considera irreversibilidades (perdas).

Rendimento de Carnot

$$\eta_C = 1 - T_L/T_H$$

T_L – Reservatório frio [K]
 T_H – Reservatório quente [K]
 η_C – Rendimento de Carnot [%]

Agora com este conceito e considerando as perdas reais no estágio de transformação do calor em energia mecânica, é possível afirmar que o rendimento térmico dessa máquina será sempre menor que o rendimento de Carnot.

3.1. Processo da cogeração

A cogeração é um processo que permite a produção simultânea de energia elétrica e térmica de uma mesma fonte primária. No capítulo 12, da obra multidisciplinar de Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, o Professor Ronaldo Andreos relata que, “a cogeração consiste no processo de produção simultânea ou sequencial de duas ou mais formas de energia, térmica e mecânica, a partir de um único combustível”, impactando significativamente na eficiência energética total do sistema. Capítulos 1,2 e 3 do livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, Professor (Simões-Moreira, J.R. 2017)

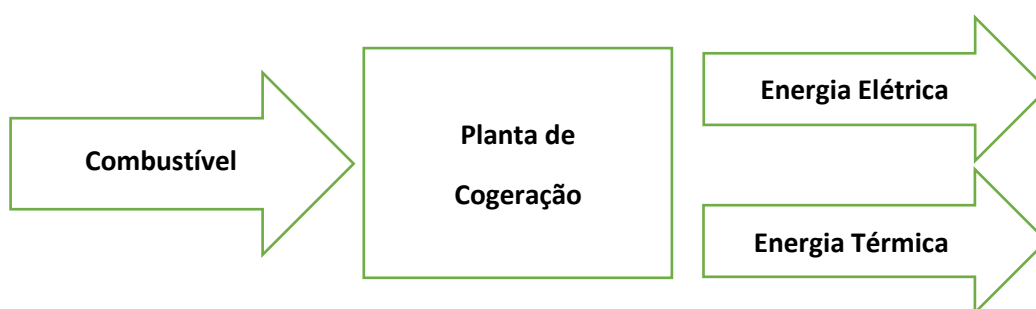


Figura 3.2 - Fluxograma típico da cogeração

Os sistemas de cogeração são bastantes variados, utilizando diferentes fontes de energia primária. Neste estudo estamos dando especial atenção para a cogeração a partir do gás natural. O processo conceitual da cogeração permanece inalterado, independente do tipo de combustível utilizado.

Quanto a implantar um sistema de cogeração ou não, são diversos os aspetos que incentivam as empresas e pessoas no momento da decisão, sendo fator chave a redução dos custos operacionais através do aproveitamento da energia excedente e não menos importante são os ganhos de confiabilidade no suprimento de energia elétrica, reduzindo os efeitos de desequilíbrios e interrupções observadas nas redes de distribuição.

3.2. História da Cogeração

- Surgimento da cogeração

Segundo o historiador René Rémond, a máquina a vapor desenvolvida por James Watt foi fundamental no processo da revolução industrial da Europa no final do século XVIII e início do século XIX, criando condições para o desenvolvimento das

grandes plantas de manufatura sem a dependência das quedas d'água, sendo fator fundamental para a primeira revolução industrial.

A partir de 1850, deu-se início a segunda revolução industrial, alavancada pelo desenvolvimento tecnológico. Principalmente os ciclos de combustão Otto e Diesel, Thomas Edson com lâmpada e Faraday com o motor elétrico.

Com o baixo rendimento das máquinas a vapor, alimentadas por caldeiras a carvão mineral principalmente, as indústrias perceberam que poderiam aproveitar o vapor na saída das turbinas para os processos industriais, reduzindo com isto os custos operacionais conforme relato de Derry & Willians, 1980. No final do século XIX, com a evolução das máquinas térmicas e crescimento da demanda por eletricidade na Europa e nos Estados Unidos, a atenção voltou para a racionalização da energia primária, incentivando pesquisas e desenvolvimento das primeiras unidades de cogeração.

- Grandes usinas geradoras

A partir do desenvolvimento de sistemas de distribuição de energia elétrica e controles da energia elétrica nas redes de distribuição, o vapor como fonte local de energia perdeu espaço para as grandes usinas centralizadas, isso em meados do século XX, abandonando o desenvolvimento de unidades de geração localizadas próximas as cargas. Na Europa, incentivos governamentais, incentivaram as indústrias com geração própria e cogeração a conectar as redes de distribuições abastecidas por grandes usinas centralizadas. A tendência de centralização da geração de energia elétrica somente se alterou com a primeira grande crise do petróleo, anos 70.

- Ressurgimento da cogeração

Com a imposição de novos preços de petróleo pela OPEP, na década de 70, os países importadores foram forçados a alternativas, tais como, novas opções para importação ou criação de programas para conservação da energia. De forma a equilibrar os custos operacionais seriamente afetados pela elevação do preço do petróleo.

Os Estados Unidos, o maior importador da OPEP, encorajou o desenvolvimento de plantas de cogeração, através do *National Energy Act*, em 1973, com a criação do PURPA (*Public Utilities Regulatory Policies Act*). A política incentivou a conexão das unidades de cogeração às redes de distribuição de eletricidade e a obrigatoriedade de compra da eletricidade produzida pelos grandes e pequenos geradores.

O PURPA estabelece também metodologia para qualificação da instalação da cogeração, através do “padrão de operação, eficiência e direito de propriedade”. O sucesso americano com a aplicação da tecnologia, levou outros países, como Inglaterra, Alemanha, Japão, dentre outros a também criarem incentivos para a implantação de plantas de cogeração em seus países, alavancando a tecnologia da cogeração e preocupação com a eficiência energética.

- Cogeração no Brasil

A cogeração no Brasil teve seu início com a indústria sucroalcooleira, também como efeito da elevação do preço do petróleo. O governo brasileiro apostou na produção de etanol para os veículos de passeio, criando o programa PRO-ÁLCOOL e incentivos para produção do etanol.

Com a moagem de altos volumes de cana de açúcar e por sua vez geração de grandes volumes de bagaço, que se tornara um problema ambiental para sua disposição. Surgiu a solução da queima do bagaço na geração de energia térmica e mais adiante eletricidade. Próximo aos anos 90, algumas plantas chegaram a atingir a suficiência energética e em alguns casos gerando excedentes de energia elétrica através da utilização do bagaço da cana (Macedo, 1989).

A corrente evolutiva seguiu e chegou as indústrias de papel e celulose e setor madeireiro, que passou a utilizar os resíduos industriais em sistemas integrados de cogeração, produzindo a energia elétrica e vapor baixa pressão para os processos industriais. Para esse segmento, podemos citar a Klabin gerando excedente de 150 MW em Puma, Paraná e a Suzano, com excedente de 100 MW em Imperatriz, Maranhão.

A cogeração utilizando excedentes da indústria traz o benefício com a geração da energia elétrica e térmica, resolvendo também a questão da disposição desses resíduos. Vale citar que cada litro de etanol gera 13 litros de vinhaça. Aliado a um poder calorífico deste rejeito, hoje continuam sendo utilizados em sua maioria para fertirrigação, com grandes riscos para a contaminação de solos no processo, e com poucas ações no sentido de utilizá-lo na geração de energia.

Estudo de caso próprio, com coordenação da Professora Suani T. Coelho, em 2017, mostrou payback em torno de 15 anos para a opção produção de energia elétrica diretamente com o biogás sem levar em conta a redução de custos com o processo de disposição da vinhaça.

Hoje os investimentos contabilizados no Brasil para cogeração através do BNDES são incipientes, podendo enumerar a termelétrica da CSN com 230 MW e o parque gráfico do jornal O Globo no Rio de Janeiro com capacidade de 5 MW. Além do BNDES, vale citar também a Coca-Cola Jundiaí, Kaiser Jacareí com plantas integradas de cogeração a partir do gás natural através de contrato firmado com a Comgás.

Em 2017, o BNDES aprovou investimento na ordem de MMR\$ 40 para planta de cogeração no sul do país para utilizar a palha de arroz em processo de beneficiamento no sul do país.

Apesar da inércia que o país atravessa, ainda é possível também observar algum movimento dos grandes comércios, hospitais, hotéis e shopping centers buscando opções para racionalização dos custos energéticos através da geração da demanda elétrica e térmica para seus processos.

3.3. Ciclos da Cogeração

As demandas por energia eletromecânica e térmica podem ser supridas por fontes independentes, por uma conexão com a rede elétrica suprindo energia elétrica para os motores e por um gerador de vapor a partir de um combustível líquido, por exemplo, para suprir as demandas térmicas em geral da instalação.

A cogeração é o processo que utiliza simultaneamente energia térmica e eletromecânica nas instalações. Para dimensionar uma cogeração devemos considerar o melhor balanço para a produção de energia, ou seja, condicionar as demandas por energias térmicas e as eletromecânicas.

A melhor concepção da cogeração quanto ao rendimento energético deverá levar em conta o ciclo com a geração principal e a secundária, em termos da demanda por energia térmica ou elétrica. Estes tipos básicos foram convencionados em *Bottoming* ou *Topping Cycle*.

- *Bottoming Cycle*

A configuração *Bottoming* tem como princípio a recuperação da energia térmica rejeitada e utilização em processos diversos. Neste ciclo o combustível é utilizado em primeiro momento para fornecer energia térmica a um equipamento da operação ou processo em geral. Uma porção do calor rejeitado é recuperado e utilizado para produção de energia elétrica, sendo tipicamente um sistema dotado de turbina a vapor. A energia elétrica gerada poder ser utilizada no local ou exportada para a rede elétrica.

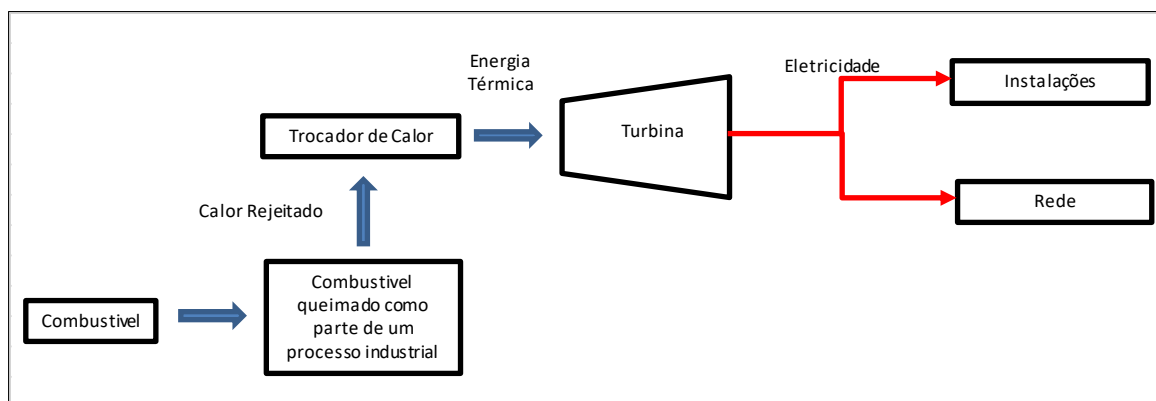


Figura 3.3 - *Bottoming Cycle: Energy Information Administration (EIA)*

- *Topping Cycle*

Para o ciclo *Topping*, o combustível é utilizado em um motor principal, podendo ser um motor alternativo ou uma turbina a gás, para geração de energia elétrica ou mecânica. A eletricidade gerada pode ser utilizada no prédio, instalações ou exportada para a rede elétrica. O gases e água de refrigeração do motor principal é então utilizado para fornecer água quente para uso direto ou geração de frio por meio de chiller de absorção.

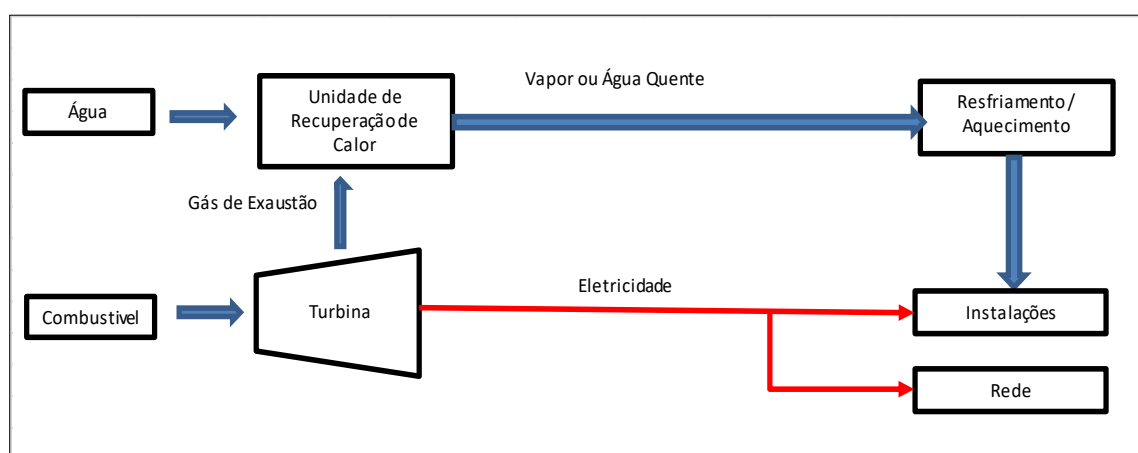


Figura 3.4 - *Topping Cycle: Energy Information Administration (EIA)*

3.4. Combustíveis

São diversos os combustíveis que podem ser utilizados como fonte primária nos processos de geração, tais como o gás natural, óleo diesel, carvão mineral, biomassa, geotermia, etc. Estaremos detalhando os aspectos somente do gás natural, por ser este o combustível adotado no presente estudo de caso.

Similar aos outros combustíveis fósseis, o gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos de origem fóssil. É um composto de gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados, contendo em maior proporção o metano (CH_4), sendo que a composição depende do processo de produção.

Conforme ANP (Agência Nacional do Petróleo), o gás natural é uma substância composta por hidrocarbonetos que permanecem em estado gasoso nas condições atmosféricas normais. É essencialmente composto pelos hidrocarbonetos metano (CH_4), com teores acima de 70%, seguida de etano (C_2H_6) e, em menores proporções, o propano (C_3H_8), usualmente com teores abaixo de 2%.

A extração do gás natural pode ser, associado ou não associado. O associado é aquele que se encontra no reservatório geológico dissolvido com o petróleo, neste caso se extrai o petróleo e o gás natural é re-injetado para manter a pressão do poço. O gás natural não associado é normalmente encontrado em camadas rochosas e livre de óleo, permitindo desta forma extrair somente o gás natural.

Composição e principais características do gás natural comercializado no sudeste, centro-oeste e Sul: (Fonte: Comgás)

- Composição do Gás Natural

Elemento	Unidade	Valor
Oxigênio (O ₂)	% mol/mol	0,000
Nitrogênio (N ₂)	% mol/mol	0,594
Dióxido de Carbono (CO ₂)	% mol/mol	1,616
Metano (C ₁ H ₄)	% mol/mol	88,683
Etano (C ₂ H ₆)	% mol/mol	5,844
Propano (C ₃ H ₈)	% mol/mol	2,339
Isso Butano (C ₄ H ₁₀)	% mol/mol	0,328
Normal Butano (C ₄ H ₁₀)	% mol/mol	0,443
Isso Pentano (C ₅ H ₁₂)	% mol/mol	0,076
Normal Pentano (C ₅ H ₁₂)	% mol/mol	0,052
Hexano (C ₆ H ₁₄)	% mol/mol	0,025

Tabela 3.1: Composição do gás natural (Fonte: Comgás)

Principais características e cuidados ao manusear o gás natural

- Densidade menor que a do ar;
- Por inalação pode provocar irritação e náuseas;
- Pela presença de compostos de enxofre, pode produzir irritação crônica;
- Em altas concentrações atua como asfixiante;
- Extremamente inflamável, pode explodir sob efeito do calor.
- Limite de inflamabilidade: inferior a 5% e superior a 15%;
- Autoignição na faixa de 482 à 632 °C
- Velocidade de chama: 35 a 50 cm/s
- Ponto de ebulição: - 161,4 °C a 1 atm (CH₄ puro).
- Ponto de Fulgor: -187,8 °C a 1 atm (CH₄ puro).
- Densidade absoluta: Faixa de 0,65 a 0,80 kg/m³
- Calor latente de vaporização: 121,9 cal/g.
- Taxa de queima: 12,5 mm/min.
- Poder Calorífico Sup.: 8.362 a 10.274 kcal/m³ a 1 atm e 20 °C.
- Poder Calorífico Inferior: 7.532 a 9.306 kcal/m³ a 1 atm e 20 °C.

O gás natural produzido no Brasil é de origem associada ao petróleo na maioria dos poços em operação, e se destina a diversos mercados de consumo, tais como,

termelétrica, cogeração, veículos automotores, comércios, residências, indústria e matéria prima. É um combustível com baixa emissão de poluentes, com queima limpa, uniforme e com menos particulados quando comparado aos derivados de petróleo.

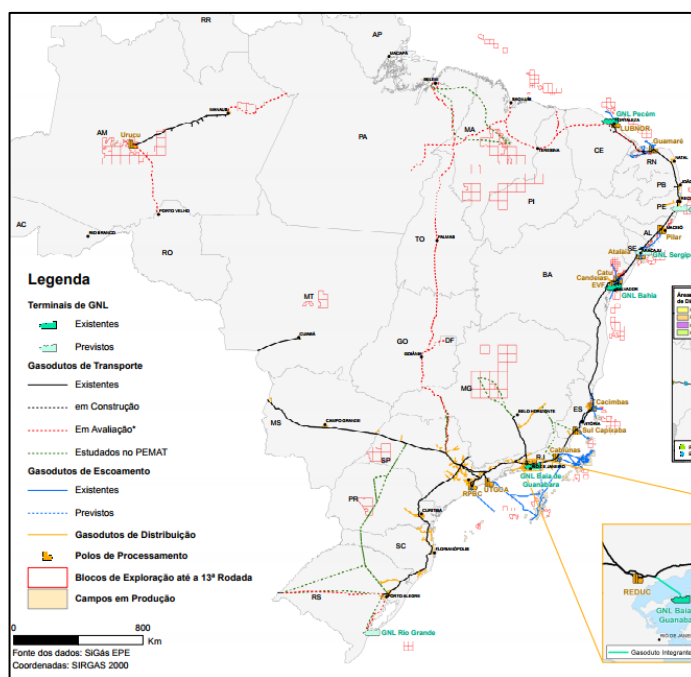


Figura 3.5 – Infraestrutura de gasoduto de transporte no Brasil

Fonte: EPE, 2009

3.5. Tecnologias aplicadas na cogeração

A seleção da tecnologia mais adequada é ponto de partida para um balanço energético equilibrado, de forma a obter a melhor eficiência energética ao longo da vida da instalação. Tão importante quanto um bom projeto são as boas práticas operacionais, fator importante para o sucesso do projeto de uma cogeração, tais como, garantir a modulação e operação do motor em condição e contínua, minimizar as partidas e paradas do motor, planejar a manutenção para as horas de baixa demanda, ter equipe capacitada para operação e manutenção, garantir as condições operacionais do motor, etc.

Discutiremos nesta seção as principais tecnologias comumente aplicadas na geração e cogeração de energia, como segue:

- **Planta de Cogeração com Turbina a Gás (Ciclo Brayton)**

É uma máquina (turbina) com admissão constante de gases quentes gerados com a queima de um combustível em uma câmara de combustão, com consequente geração de energia elétrica e produção de vapor de baixa pressão por meio de recuperador de calor utilizando os gases da saída da turbina. É muito aplicada quando é demandado uma grande quantidade de energia elétrica e vapor baixa pressão nos processos industriais.

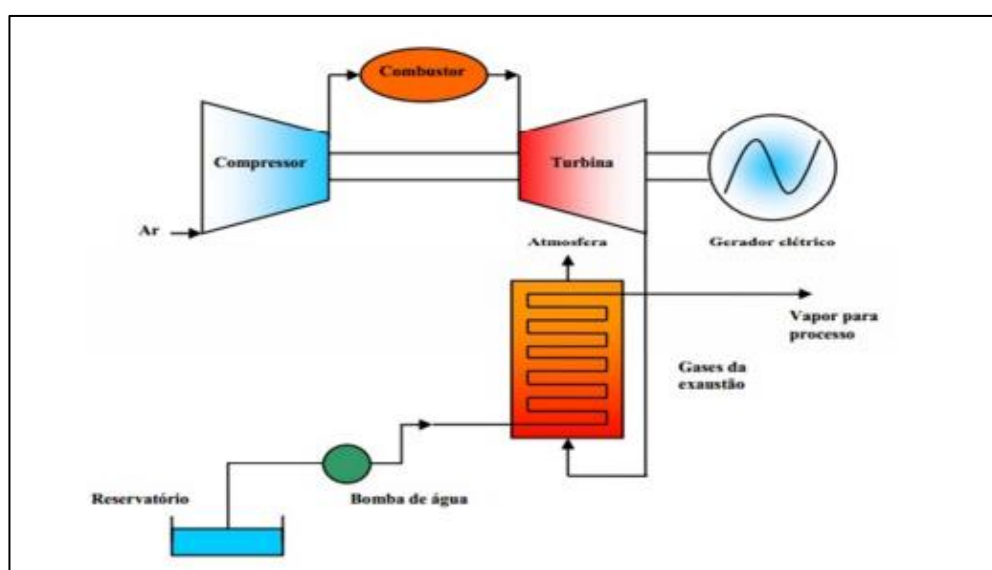


Figura 3.6- Ciclo Brayton

Fonte: Revista Eletrônica de Energia – Soluções Ciclo Brayton

Em uma planta de cogeração ciclo Brayton, os gases de exaustão, são relativamente limpos e secos, podem ser reaproveitados em processo para geração de vapor baixa pressão como demonstrado na figura, em processos de secagem diversos e também como fonte de calor para chiller de absorção ou para pré-aquecer o ar de combustão do próprio processo.

Para os processos de cogeração utilizando turbina a gás o rendimento pode chegar a 75% e gases de exaustão na ordem 500° C, sendo aplicado este tipo de ciclo em sistemas de média e alta potência, utilizados em plantas químicas, celulose e indústria alimentícias, como a Heineken de Jacareí, SP, como exemplo.



Figura 3.7 - Cogeração Ciclo Brayton – Heineken, Jacareí, SP

As principais vantagens para esse tipo de planta são os menores tempos de paradas para manutenção e a energia térmica a temperaturas entre 500 e 600° C. Como desvantagens identificamos a vida útil reduzida da instalação e a falta de eficácia em processos com baixa demanda por energia térmica.

- **Planta de Cogeração com turbina a vapor (Ciclo Rankine)**

As unidades de cogeração ciclo Rankine geralmente são compostos por um pré-aquecedor, caldeira, turbina, condensador e gerador. Neste tipo de sistema é possível utilizar calor residual de outro processo ou equipamento.

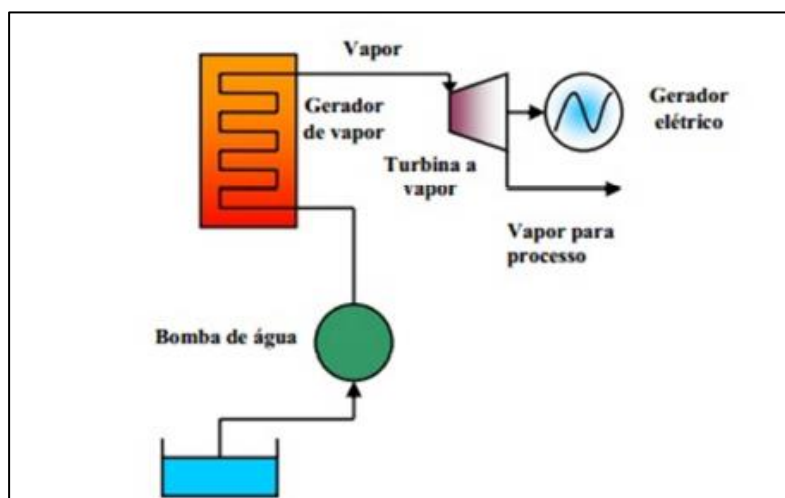


Figura 3.8- Ciclo Rankine

Fonte: Revista Eletrônica de Energia – Soluções Ciclo Rankine

Sua operação consiste em bombear a água para a caldeira, através da queima de um combustível é produzido vapor superaquecido em alta pressão, e em seguida este vapor alimenta a turbina e por meio da expansão produz energia mecânica, energia elétrica através do gerador e por final, parte do vapor é utilizado em processos, com retorno de condensado para reiniciar o ciclo.

As turbinas a vapor se dividem em dois grupos, que são as turbinas de condensação e de contrapressão. As de condensação tem a pressão de vapor de saída menor que uma atm, portanto, é necessário a existência de condensador. As de contrapressão tem a pressão de saída maior que 1 atm.

A turbinas a vapor apresentam como principais vantagens a vida útil elevada, alta eficiência, dentre outras. Podemos citar como desvantagens o alto investimento e o baixo rendimento elétrico.

- **Planta de Cogeração Ciclo Combinado**

Através da junção dos dois tipos de ciclos em um único (gás + vapor), propiciou a elevação do rendimento e efetividade da cogeração.

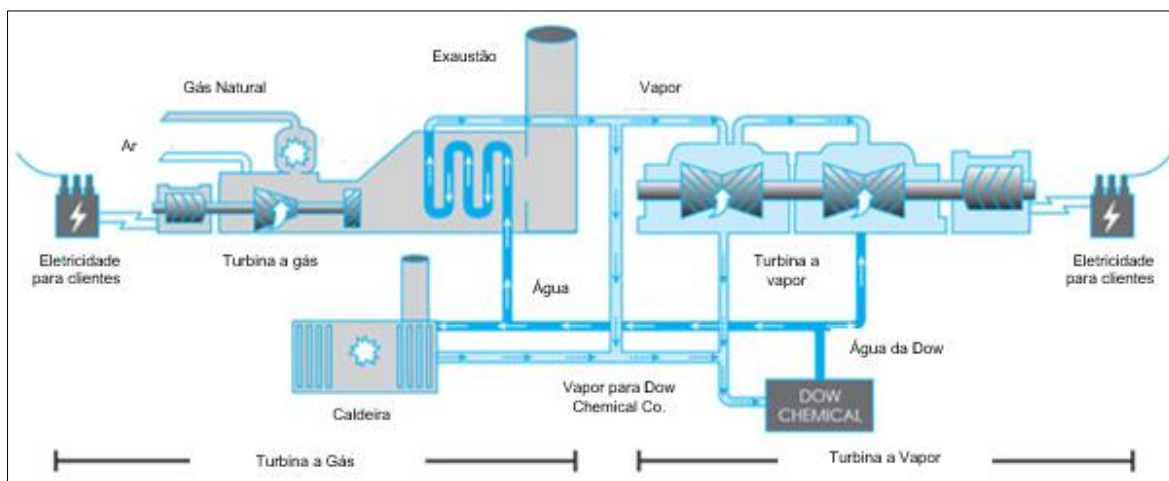


Figura 3.9 – Cogeração Ciclo Combinado: Brayton – Rankine
Geração de eletricidade e vapor

Fonte: MCV – Midland Cogeneration - USA

Esse tipo de planta é projetado de forma que uma turbina complementa a outra. Na turbina a gás, onde acontece a geração de energia elétrica e como os gases de exaustão (450 e 500° C) contem grande quantidade de oxigênio, propiciando uma boa queima em uma caldeira de recuperação para produção de vapor de alta pressão no segundo ciclo (Rankine), produzindo energia elétrica e disponibilizando vapor para o processo industrial.

Este tipo de configuração é aplicado quando se deseja produzir energia elétrica e térmica em quantidades variáveis conforme demanda de processo. É possível obter alta produção de eletricidade sem retirar vapor para processo, enquanto que situação contrária também é possível. Além da flexibilidade deste tipo de cogeração, o rendimento pode chegar a 85%, maior quando comparado com os ciclos isolados. As vantagens apresentadas pelo ciclo combinado são a alta eficiência, flexibilidade e redução dos custos operacionais, e como desvantagem podem os citar a maior complexidade deste tipo de sistema.

- **Microturbinas**

O princípio de funcionamento da microturbina baseia-se no fato de que parte da energia gerada pela turbina é utilizada para mover o compressor, estando estes conectados ao mesmo eixo. O compressor impulsiona o ar para a câmara de combustão, formando a mistura de ar comprimido e combustível produzindo a combustão em regime contínuo. O gás quente se expande na turbina, transformando a energia térmica em energia mecânica.

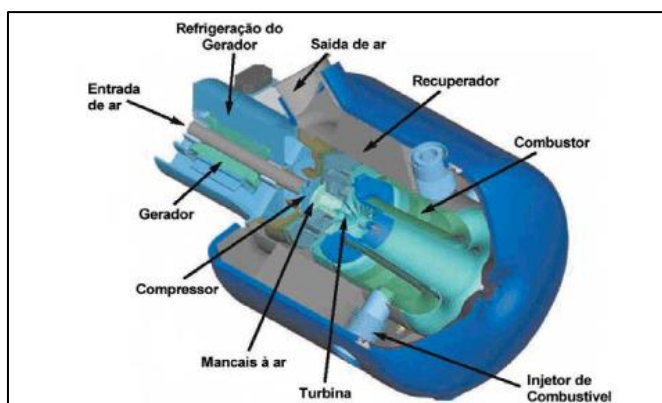


Figura 3.10 - Microturbina 30 Kw
Capstone Turbine Corporation

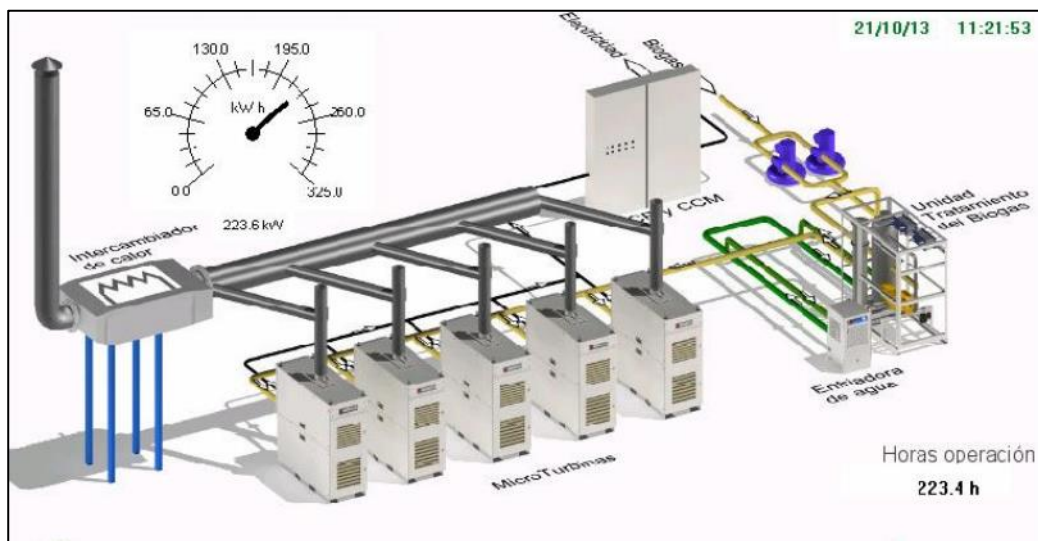


Figura 3.11 - Cogeração aplicando microturbinas

Fonte: Micropower Europe

- **Células a Combustível**

As células a combustível se apresentam com grandes perspectivas para o segmento de veículos automotores na busca da redução da poluição atmosférica, hoje uma grande incógnita. Estas células de combustíveis são a grosso modo uma bateria que atua como conversor direto de energia química em energia elétrica e térmica, produzindo corrente contínua através da combustão do hidrogênio.

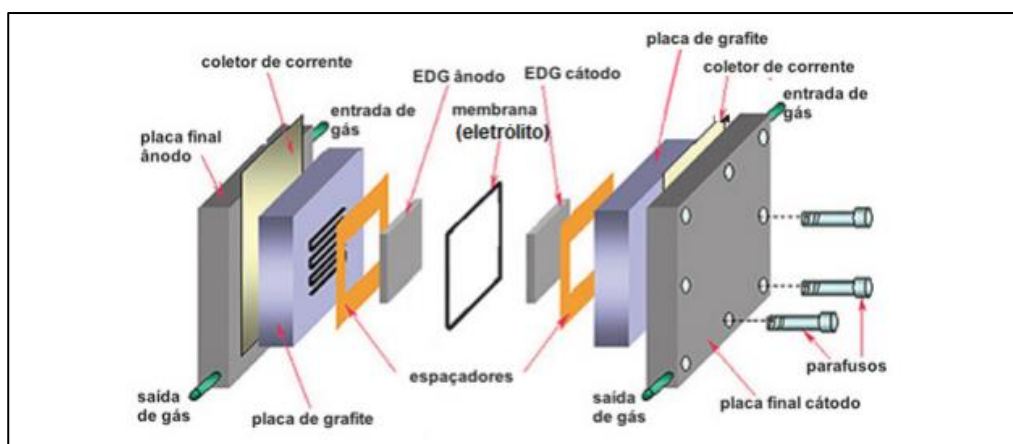


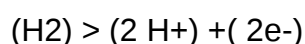
Figura 3.12 - Célula a combustível tipa unitária

CNEN-SP (Tese Patrícia SP Silva)

A pesquisa para desenvolver as células a combustível teve início em 1800, mas somente em meados do século XX foi produzida a primeira célula com potência de 5 KW. Incentivado pela crise do petróleo nos anos 70 o desenvolvimento ganhou força nos Estados Unidos, Europa e Japão.

A estrutura física de uma célula a combustível é composta por um eletrólito, um ânodo e um cátodo. Existe bastante semelhança da célula com a bateria, diferindo no aspecto que a bateria tem energia definida em seu interior, diferente das células que são supridas por fontes externas, podendo produzir indefinidamente, desde que havendo fonte de combustível e de oxigênio.

O processo consiste na produção de corrente contínua por meio da combustão eletroquímica a frio do hidrogênio e ao mesmo tempo liberando elétrons, como demonstrado na equação abaixo:



São diversos os tipos de células e cada uma tem a sua aplicação em função de suas características. É comprovada a possibilidade de cogeração em células a combustível, sendo neste caso importante que a temperatura de operação da célula combustível seja elevada, para melhorar a recuperação de calor residual e por sua vez a eficiência, podendo atingir até 85%, conforme Silveira, 1999.

Vale salientar que o hidrogênio não é considerado um energético, pois este se encontra sempre associado a outros componentes, como carvão, petróleo, gás natural, etanol dentre outros, sendo necessária energia para separar o hidrogênio das estruturas energéticas originais.

Apresentamos a tabela com algumas alternativas para fontes, produção de hidrogênio e uso final da célula, conforme CAPAZ, 2006.

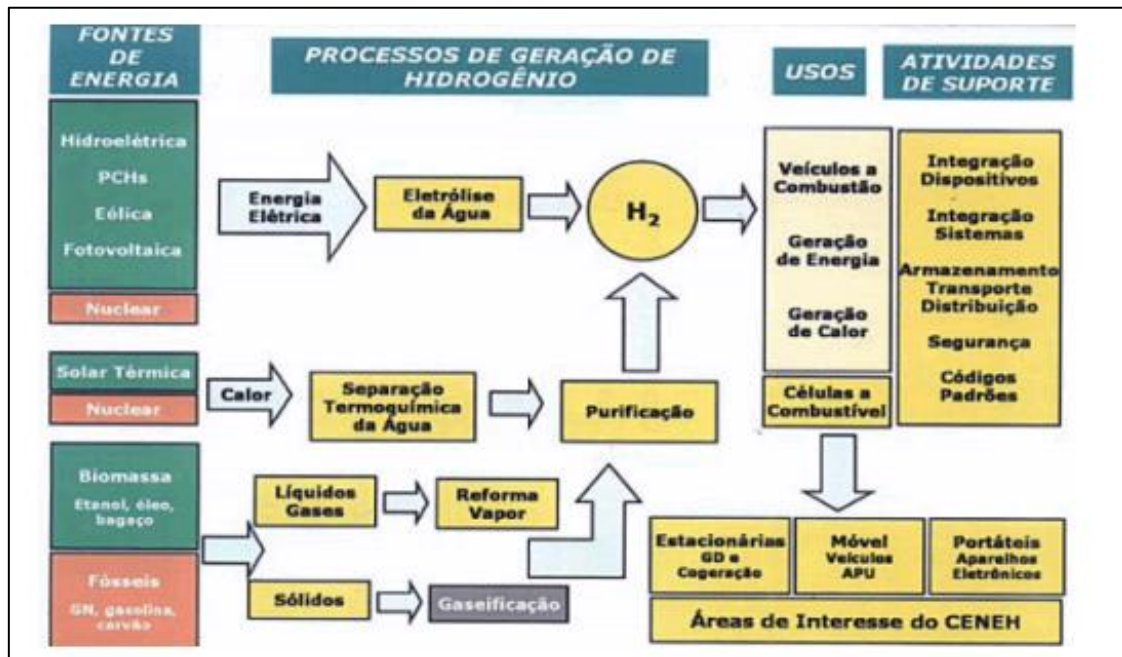


Tabela 3.2 - Fontes, produção e uso de células a combustíveis
(CAPAZ, 2006)

- **Ciclo de combustão interna (Motor de Combustão Interna);**

Em 1900, Rudolf Diesel apresentou seu protótipo de motor por compressão utilizando óleo vegetal, funcionando por poucas horas em baixa rotação. Após a segunda guerra iniciou-se a produção e comercialização dos motores Diesel, na ocasião utilizando petróleo filtrado. Logo em seguida, com a evolução do processo de refino do petróleo, a fabricação e comercialização dos motores a diesel e gasolina se multiplicaram.

Motor é uma máquina destinada a converter a energia química do combustível em potência mecânica. Os motores de combustão interna são classificados em ciclo Otto e ciclo Diesel. O primeiro, otto, funciona com a aspiração da mistura ar-combustível e a queima do combustível é iniciada por meio de uma centelha. O Diesel aspira o ar, comprime e então é pulverizado o combustível (óleo diesel) que, por meio da temperatura e pressão entra em combustão.

Para os motores de combustão interna, tanto para o ciclo Otto quanto o Diesel, todo o calor produzido nos cilindros tem a finalidade de gerar trabalho, o que não se observa na prática. Apenas uma fração do calor produzido, em torno de 30% são transformados em potência útil, o restante se perde pelo sistema de refrigeração, gases de descarga, radiação térmica para a carcaça e ambiente e sistema de lubrificação, conforme Mesny, 1958.

Os motores de combustão interna não foram muito difundidos para os processos de cogeração, mesmo tendo eficiência alta, devido ao baixo percentual de recuperação devido a temperatura dos gases, quando comparado as turbinas a gás, por exemplo.

Os motores operando em altas rotações (1000 a 1800 RPM) são os motores de menores potência, os quais utilizam combustíveis gasosos ou líquidos leves, tais como gás natural ou gasolina. E a utilização de motores para sistema de cogeração é bastante difundido, sendo esta uma excelente alternativa para obtenção de altas eficiências.

Conforme os professores Walter e Bajay da Unicamp, 1989, na utilização de motores de combustão interna em sistema de cogeração observamos as seguintes vantagens:

- Curtos períodos requeridos para construção e instalação;
- Facilidade de manutenção;
- A possibilidade de construção em módulos;

Estaremos a partir deste ponto discutindo os motores de combustão interna do ciclo Otto, modelo utilizado no presente estudo de caso.

- Motor do ciclo Otto, 4 tempos

O motor de 4 tempos do ciclo Otto, opera com 4 pistões, sendo que o trabalho mecânico será produzido no tempo em que ocorre a expansão em cada um dos pistões, como melhor demonstrado a seguir. Este modelo se aproxima dos motores comumente utilizados com ignição por centelha movido a etanol, gás natural ou gasolina.

- Cilindrada de um motor de combustão interna

Para definir a cilindrada precisamos falar do PMS (ponto morto superior) e PMI (ponto morto inferior) quando observamos os trajetos alternativos dos pistões.

Quando o pistão se encontra no PMS o volume da câmara de combustão é mínimo para aquele projeto de motor, ou seja, é o momento que antecede o início da admissão da mistura ar-combustível. Seguindo o movimento alternativo, a partir da admissão, o pistão atinge o PMI, quando a câmara de combustão atinge volume máximo.

A cilindrada é o volume deslocado pelos pistões, e o volume deslocado por um dos pistões é chamado de cilindrada unitária, conforme o capítulo de máquinas e processos de transformação de energia térmica, definido pelo professor Jose Roberto Simões, na obra Energias Renováveis de 2017.

$$VD = VT - V0$$

$$VD = N [(\pi \times d^2) / 4] \times s$$

$$VD > \text{Cilindrada}$$

$$VT > \text{volume total}$$

$$V0 > \text{volume mínimo}$$

$$N > \text{quantidade de cilindros}$$

$$d > \text{diâmetro do cilindro}$$

$$s > \text{curso do pistão} = \text{PMS-PMI}$$

- Taxa de compressão do motor de combustão interna

Taxa ou razão de compressão é a razão entre o volume total do cilindro e o volume da câmara de combustão com pistão na posição PMS.

$$\text{Taxa de compressão} = VT / V0$$

- Processos para o motor ciclo Otto, 4 tempos

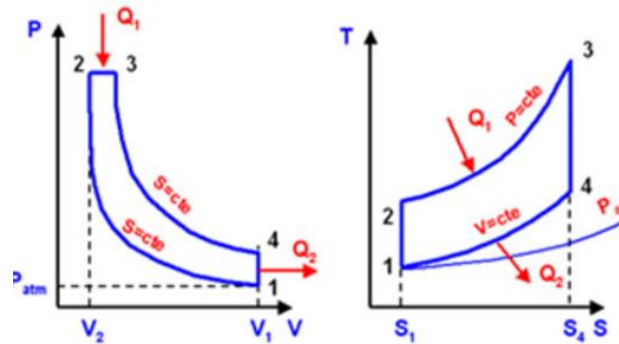


Figura 3.13 – Processos do motor 4 tempos

- Compressão da mistura ar-combustível > processo (1-2)
- Combustão com geração de calor > processo (2-3)
- Expansão e realização do trabalho > processo (3-4)
- Escape do calor rejeitado pela exaustão > processo (4-1)

- Ciclo de cogeração com motores de combustão interna

No capítulo 12 do manual de Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, o Prof. Andreos esclarece que o rendimento elétrico para este tipo de ciclo é bastante elástico, variando entre 25 e 45 %, devido ao forte desenvolvimento na busca de maior eficiência elétrica.

Quanto maior a eficiência elétrica menor será a recuperação de calor útil. No fluxograma da figura 15, o rendimento elétrico é 30 %, energia térmica útil 50%, considerando as perdas de 15% devido a eficiência dos recuperadores e 5% são as perdas por radiação na carcaça.

Os esquemas para este tipo de ciclo são estabelecidos conforme as demandas por energia, podendo ser energia elétrica e água quente, energia elétrica e água gelada ou ambas, aí chamada de trigeração.

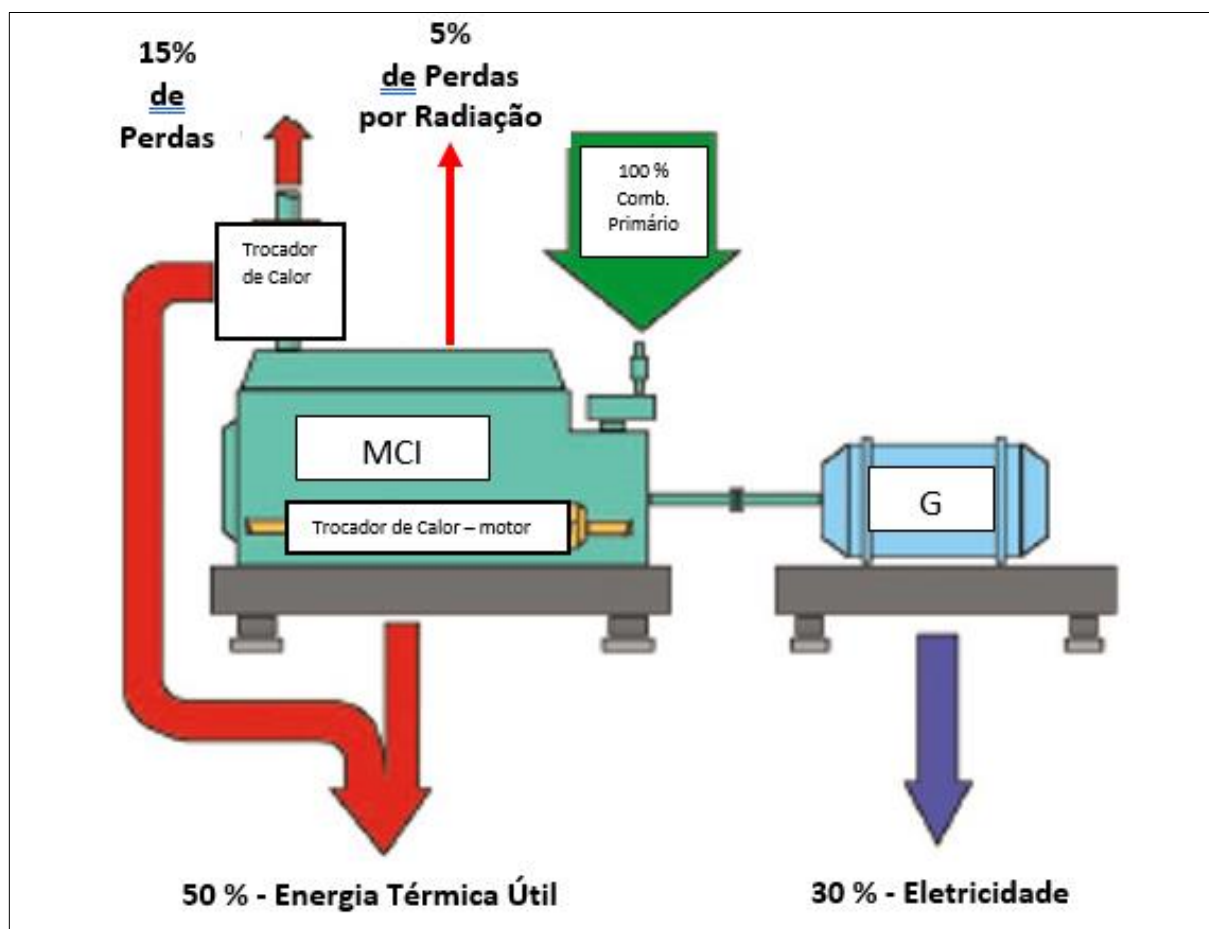


Figura 3.14 – Cogeração típica

Fonte: *Action Energy - UK*

3.6. Qualificação da cogeração e fator de utilização da energia

- Processo de qualificação da cogeração no Brasil

No ano 2000, com a resolução normativa N° 21, a ANEEL estabelece alguns requisitos para a qualificação da cogeração, objetivando incentivar o melhor aproveitamento dos combustíveis com menor consumo total, quando comparada com a geração individual de energia elétrica ou térmica, agregando benefícios para a sociedade, como já aplicado nos EUA por meio do *National Energy Act 1978*, e a Europa com incentivos similares.

O governo brasileiro, através da lei 9.991 (2000), buscou incentivar a pesquisa e desenvolvimento através do programa P&D para o segmento energético. Estabelecia que as empresas concessionárias do segmento da geração, transmissão e distribuição deveriam aplicar anualmente 1% da sua receita em P&D (pesquisa e desenvolvimento), deixando isentas as PCH's, biomassa, cogeração qualificada, usinas eólicas e solares.

- Resolução normativa 235 (2006)

Em 14 de novembro de 2006, através da resolução normativa 235, a partir da audiência pública 003/2006, recebeu diversas sugestões dos agentes envolvidos que culminou nessa regulamentação objetivando participação nas políticas de incentivo ao uso racional de energia.

- Aplicação da RN 235, 2006

A RN 235 aplica-se a empresas ou consórcios que produzam energia elétrica destinada ao serviço público ou à produção independente, e também a pessoa física, jurídica ou consórcios de empresas que produzam energia elétrica destinada a autoprodução com excedente para comercialização. A cogeração qualificada é atribuída a cogeradores que atendam aos requisitos desta resolução, para fins de participação nas políticas de incentivo a cogeração.

- Requisitos para qualificação

A unidade de cogeração deverá estar regularizada junto a ANEEL e a atender aos critérios mínimos como segue:

$$- (Et/Ef) \geq 15\%$$

Et > energia da utilidade de calor líquida em KWh/h

Ef > energia da fonte em [KWh/h] (para combustíveis PCI)

$$- (Et/Ef) / X + Ee/Ef \geq Fc\%$$

X > fator de ponderação (conforme tabela abaixo)

Ee > energia da utilidade eletromecânica líquida em KWh/h

Fc % > fator de cogeração em [%]

Tabela de ponderação		
Fonte / potência elétrica instalada	X	Fc%
Derivados de petróleo, gás natural e carvão		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo		
Acima de 20 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Tabela 3.3 – Ponderação processo de qualificação da cogeração

- Fator de utilização de energia - FUE

O sistema elétrico nacional (SIN) é muito dependente das centrais hidrelétricas, e pouco menos de outras fontes. As termelétricas em maior escala, seguido das eólicas, biomassa e por último as poucas usinas fotovoltaicas em operação. O processo de gestão do SIN utiliza as termelétricas para controlar os níveis dos reservatórios das hidrelétricas e para suprir demandas pontuais, principalmente em período de pico de consumo com baixo nível dos reservatórios. É regra o fator de utilização de combustível de 40% para as usinas termelétricas, projetando um potencial de 85% de fator de utilização para as usinas com sistema de recuperação de calor para geração adicional de energia elétrica. Seria mais que dobrar o FUE sem nenhum incremento de combustível.

No capítulo de cogeração do manual de Energia Renovável, Geração Distribuída e Eficiência Energética, o Professor Ronaldo Andreos compara a geração termelétrica convencional e livro energias renováveis, Simões-Moreira, J.R. 2017, com a cogeração como demonstrado:

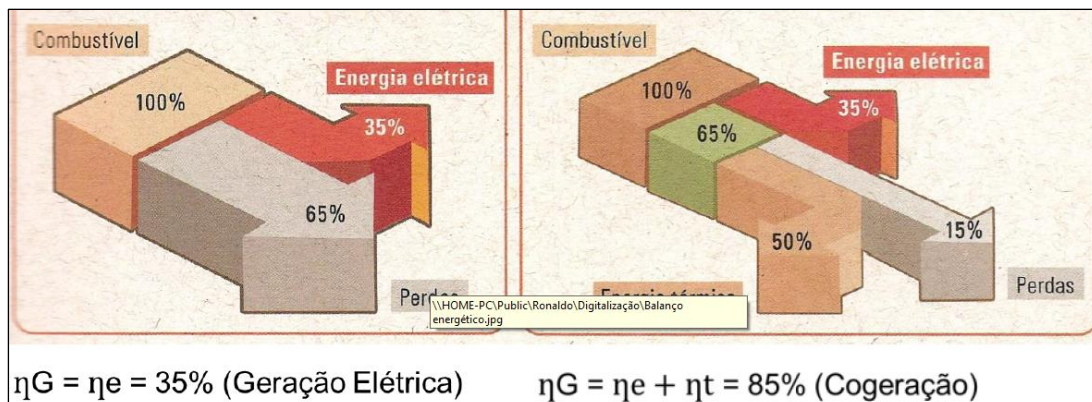


Figura 3.15 – Balanço energético: sistema convencional x cogeração

Fonte: Ronaldo Andreos, 2017

- Cálculo do fator de utilização de combustível – FUE

$$\text{FUE} = (\dot{W} + \dot{Q}_u) / \dot{m} \times \text{PCI}$$

FUE = Fator de utilização de energia [%]

$\dot{W}$ = Potência de eixo produzida pela máquina [KW]

$\dot{Q}_u$ = Taxa de calor útil produzido ou recuperado [KW]

PCI= Poder calorífico inferior do combustível [KJ/Kg]

$\dot{m}$ = vazão mássica de combustível [Kg/s]

4. ESTADO DA ARTE DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A matriz energética mundial é composta por diversas fontes primárias, sendo predominantes as fósseis, um pouco diferente quando comparado com a matriz brasileira, devido a predominância das fontes hidráulicas.

A luz dos níveis alarmantes da qualidade do ar nos grandes centros influenciado pela utilização de combustíveis fósseis, as energias limpas começaram a aparecer em cena como opção para melhoria ambiental, e dentre essas fontes a solar fotovoltaica ganhou seu espaço. É uma tecnologia que combina com a geração distribuída por ter um projeto relativamente simples e a abundância de radiação solar em boa parte do planeta, conferindo em baixíssimo custo operacional para a modalidade.

Neste capítulo passaremos pela evolução da tecnologia, uma breve revisão conceitual e os tipos sistemas comumente utilizados.

4.1. Evolução da geração de energia solar fotovoltaica

A evolução demonstrada na figura 18 é nítida, por meio da maior inclinação da curva da potência instalada da geração fotovoltaica frente a hidráulica, nuclear e eólica, mesmo com gritantes diferenças entre os fatores de capacidade (C_f).

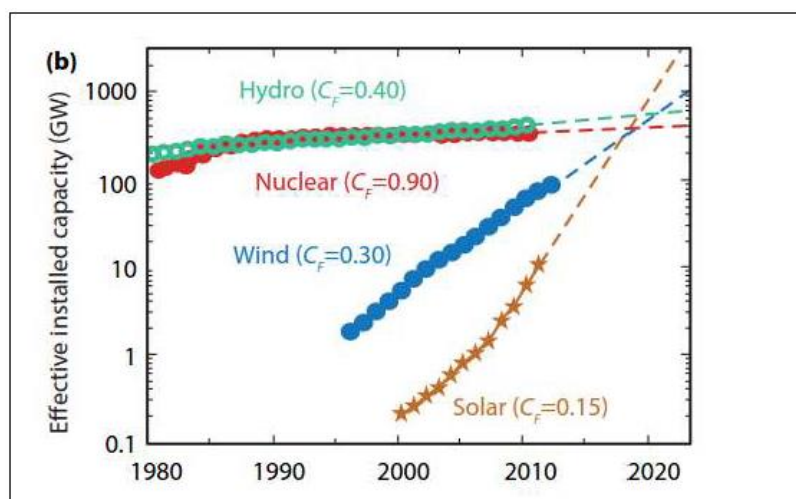


Figura 4.1 -Evolução capacidade instalada da geração FV Mundial

Fonte: Delft University - 2014

Para o segmento residencial, a evolução da geração fotovoltaica é influenciada pela simplicidade dos projetos e principalmente pela velocidade no desenvolvimento das tecnologias, fato que reflete em forte redução de custos como pode ser observado no gráfico da IEA (*International Energy Agency*), 2009.

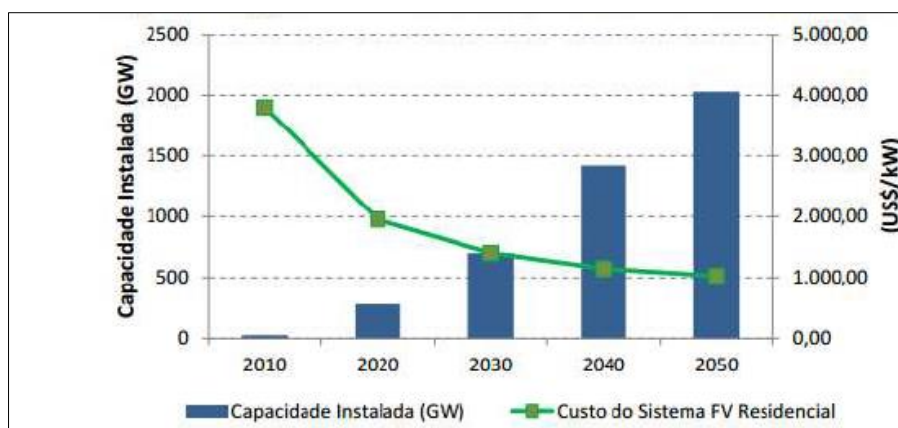


Figura 4.2 - Evolução capacidade instalada versus custo
Ger. Fv Residencial - IEA - 2009

No Brasil a tecnologia era mais aplicada em pequenos sistemas isolados e não supridos por energia elétrica, fato que mudou radicalmente partir de 2012 com a resolução normativa 482. Regulamentou a geração distribuída com as regras para a conexão de pequenos geradores as redes de distribuição.

Também em 2012 foi publicada a ANBT NBR IEC 62116 padronizando o ensaio para inversores fotovoltaicos utilizados em SFCR. Componente chave no processo de transformação da energia com a forma de corrente contínua em alternada, fazer o sincronismo com a rede e atuar na segurança operacional de forma a garantir que o inversor seja desconectado da rede em caso de falta de energia da concessionária, e esta proteção é denominada “anti-ilhamento”.

Quanto ao desenvolvimento dos recursos humanos para consultoria, projetos e instalações, vale salientar o papel das universidades, e em especial a Universidade de São Paulo em seu programa de educação continuada, energia renovável, geração distribuída e eficiência energética, contribuindo para a qualificação de profissionais.

No Brasil o acentuado crescimento do número de conexões de geradores com tecnologia fotovoltaica a partir de 2012 ocorreu devido a regulamentação para a geração distribuída e o incremento na taxa de conexão entre os anos 16 e 17 foi consequência da elevação das tarifas de energia elétrica no mercado regulado.

A elevação das tarifas em média de 50% ocorreu devido aos baixos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas e consequente despacho das térmicas a gás, as quais tem custo do KWh gerado bastante superior.



Figura 4.3 – Unidades consumidoras geração Fv no Brasil
Fonte: elaboração própria / Informações: ANEEL

4.2. Conceitos gerais da energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é proveniente da conversão direta da radiação solar em eletricidade. O fenômeno fotovoltaico consiste na transformação da radiação eletromagnética solar em energia elétrica, através da criação de uma diferença de potencial sobre uma célula formada por materiais semicondutores.

A quantidade de energia gerada depende principalmente da localização geográfica, da hora do dia, do dia do ano, condições climáticas, da composição do ar atmosférico e da altitude, e, é claro, está também condicionante a eficiência da tecnologia e projeto aplicado.

- Formas de radiações solares

A radiação solar ao se propagar na atmosfera é submetida a transformações complexas. Da camada exterior à atmosfera até incidir na superfície da Terra, a radiação é absorvida e espalhada. Devido a estes fatores, observamos no nível do solo não somente a radiação solar direta, na forma de feixe de raios solares paralelos, mas também a radiação difusa e a refletida, como demonstrado na equação das radiações abaixo:

$$\text{Eq. das radiações} = \underbrace{I_b R_b}_{\text{Direta}} + \underbrace{I_d \left[\frac{(1 + \cos B)}{2} \right]}_{\text{Difusa}} + \underbrace{(I_b + I_d) * \text{Reflexão solo} * \left[\frac{(1 - \cos B)}{2} \right]}_{\text{Refletida}}$$

I_b > Radiação direta integrada horária J/m^2

R_b > Razão entre a radiação direta no plano inclinado com o plano horizontal

I_d > Radiação difusa integrada horária J/m^2

B > Ângulo de inclinação no módulo fotovoltaico em graus

- Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico consiste em geração de diferença de potencial quando um semicondutor é exposto a luz visível na forma direta, difusa e refletida.

A figura abaixo demonstra esquematicamente a operação de uma célula fotovoltaica formada por dois semicondutores.

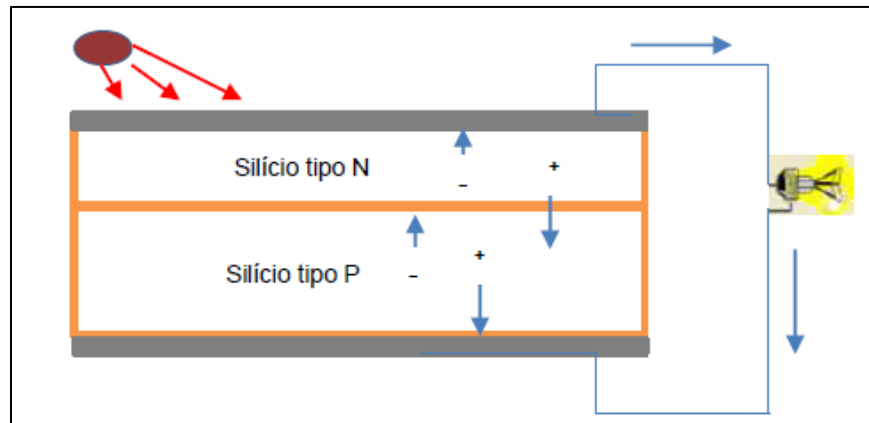


Figura 4.4 - Célula fotovoltaica de silício com dois semicondutores

Existem na natureza diversos materiais classificados como semicondutores, sendo o silício o mais aplicado comercialmente.

O efeito fotovoltaico ocorre, como ilustrado acima, com a utilização de pelo menos dois semicondutores, os quais receberão em suas estruturas átomos denominados dopantes, sendo um doador e outro receptor de elétrons.

O silício do lado (N), recebe a dopagem pentavalente, gerando elétrons livres sem gerar lacunas. Enquanto que o silício do lado (P), recebe dopagem trivalente, gerando lacunas.

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores, os quais são melhores condutores que o material isolante e pior que o material metálico (condutor).

Estes materiais, tanto metal, quanto o isolante e o semicondutor, se caracterizam por camadas de energia, denominadas bandas, que são as de valência e condução. Entre essas bandas tem uma barreira a ser transposta chamada de *band gap*.

Para transpor essa barreira é necessária uma quantidade de energia. Para o metal a condução ocorre com baixo valor de energia devido à sua boa condução, enquanto que para o isolante será necessário mais de 3eV e para os semicondutores a energia requerida será menor que 3eV.

Para o caso dos semicondutores, a energia luminosa (fótons) que atinge a banda de valência, é suficiente para vencer a barreira (*band gap*), e os elétrons seguem para a banda de condução e por sua vez para a carga, como indicado no esquemático acima.

A relação entre a frequência e a energia luminosa é dada pela equação Planck-Einstein:

$$E = hf$$

E > energia em [J] ou [eV]

h > constante de Planck ($6,6256 \times 10^{-34}$ [Js])

f > frequência da onda luminosa visível em ciclos por segundo [Hertz]

- Tipos de células fotovoltaicas

Existem diversas tecnologias utilizadas para fabricação de células fotovoltaicas, sendo as de silício as mais comuns. Apresentamos abaixo o processo de fabricação do silício utilizado nas células fotovoltaicas e em outras aplicações da eletrônica.

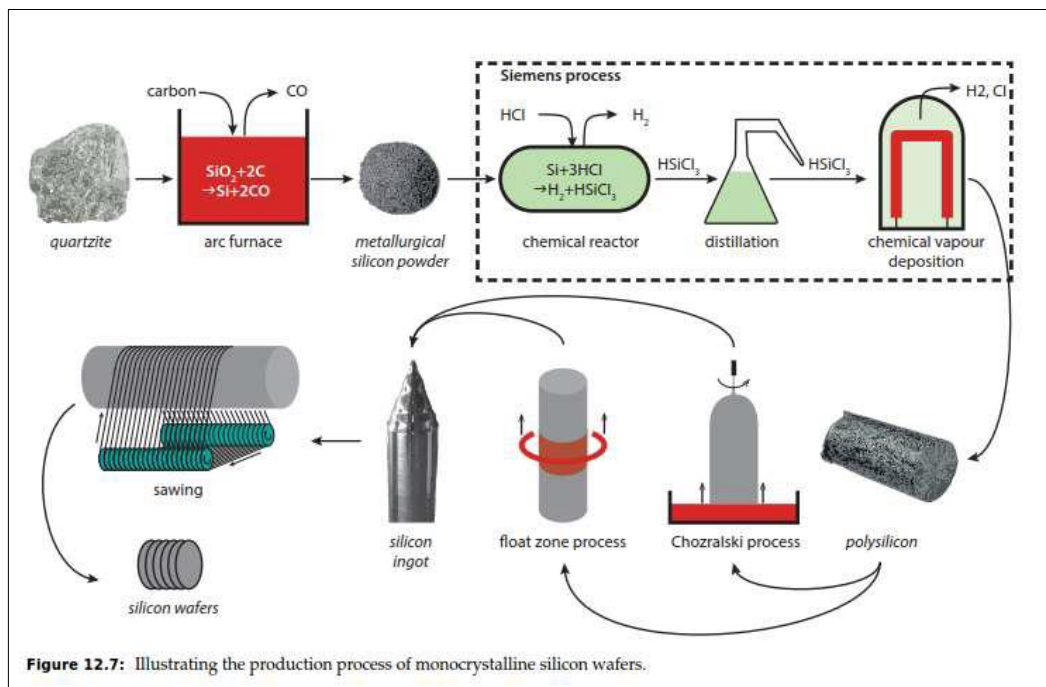


Figura 4.5 - Processo de fabricação das bolachas de silício
Fonte: Delft University

Os *silicon wafers* (*bolachas de silício*) como são chamados, são fabricados de finas camadas de silício para serem tratados de várias formas, dependendo da eletrônica de aplicação.

Os wafers utilizados para fabricação de células fotovoltaicas são submetidos a um processo químico para receber as impurezas, chamadas de dopagem, formando a camadas de silício P e N, as quais são a base para a ocorrência do efeito fotovoltaico. A partir do elemento silício encontramos as tecnologias monocristalino, policristalino e filmes finos.



Figura 4.6 – Tipos Painéis Fotovoltaicos de Silício
Monocristalino / policristalino / filme fino

Comparação entre as tecnologias silício mono e policristalino (As mais aplicadas nos sistemas fotovoltaicos atualmente)		
	Monocristalino	Policristalino
Vantagens	Eficiência comercial das células FV - 14 a 21%	Menores perdas de materiais no processo de fabricação
	Vida útil maior que 30 anos	Vida útil maior que 30 anos
	Melhor eficiência com menor exposição solar	São comumente mais baratos que os monocristalinos
Desvantagens	São comumente mais caros que os policristalinos	Necessita maior área de exposição
	Maiores perdas de materiais no processo de fabricação	Eficiência comercial das células FV - 13 a 16,5%

Tabela 4.1 – Comparação entre painéis fotovoltaicos de silício mono e policristalino

- Painéis fotovoltaicos

A partir das células são montados os painéis fotovoltaicos, composto por várias células em série ou paralelo. Tipicamente um painel é formado por 36, 54 ou 60 e 72 células, isto para cada classe de potência.

As curvas abaixo representam a variação da corrente em função da tensão (I-V) de um painel fotovoltaico, e por sua vez tem uma curva correspondente (P-V), que demonstra a variação da potência em função da tensão.

Também ilustramos a influência da radiação solar na curva (I-V), por sua vez variando a potência versus a tensão, e por último a influência da temperatura na curva (I-V).

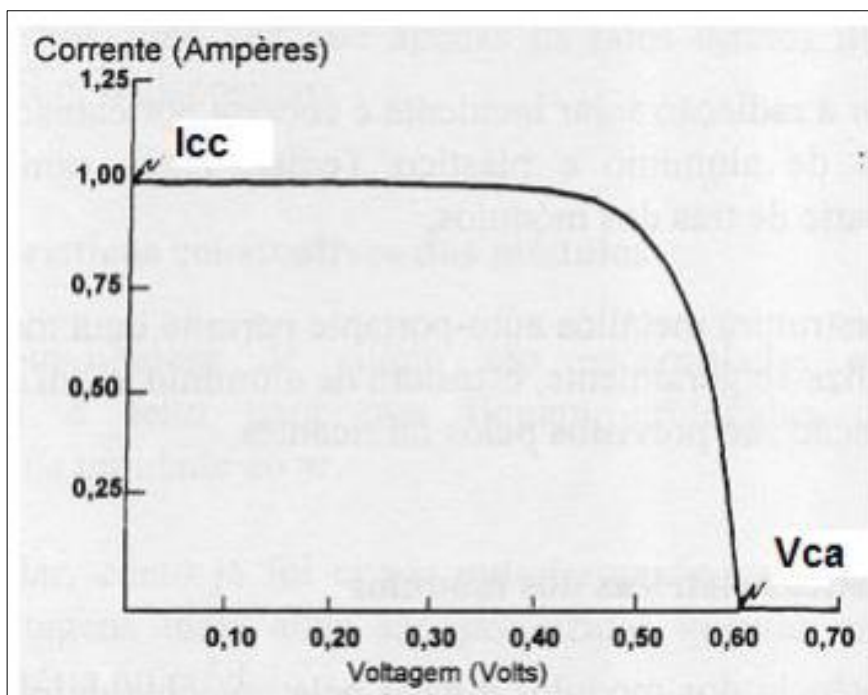


Figura 4.7 - Curva típica (I-V)

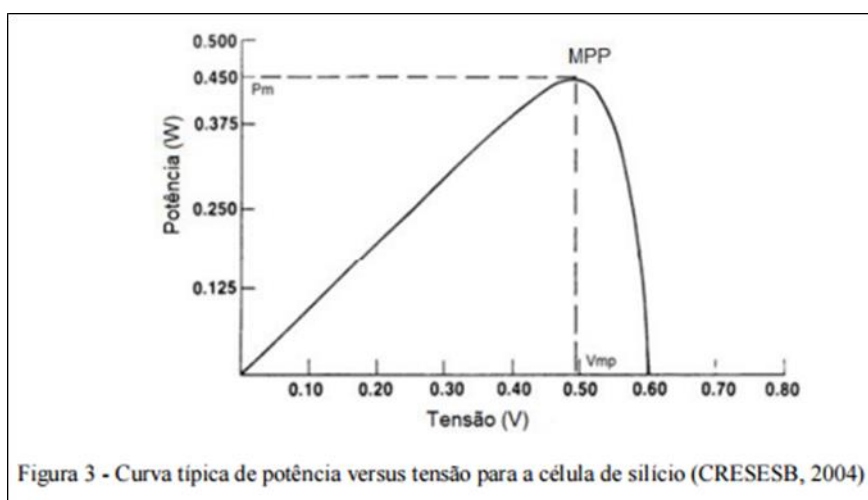


Figura 3 - Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício (CRESESB, 2004)

Figura 4.8 - Curva típica (P-V)

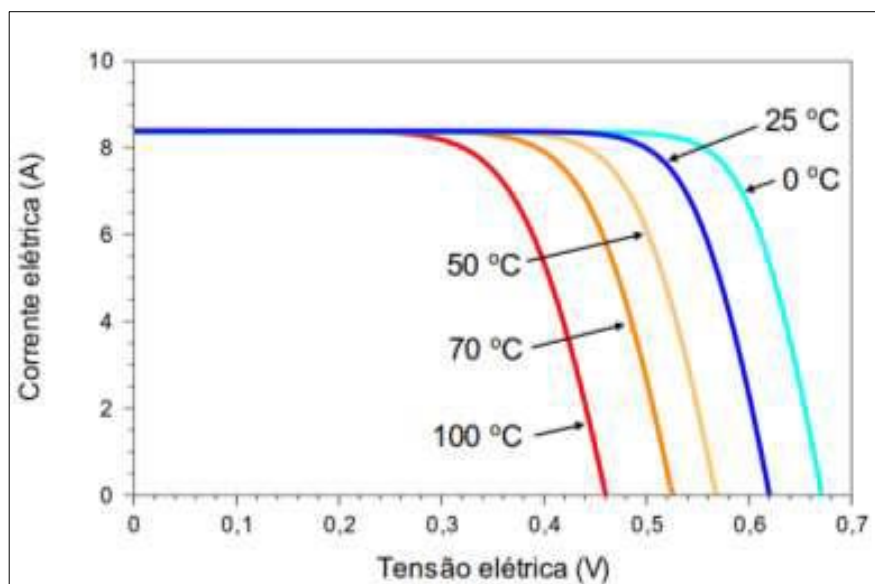


Figura 4.9 - Influência da temperatura na curva (I-V)

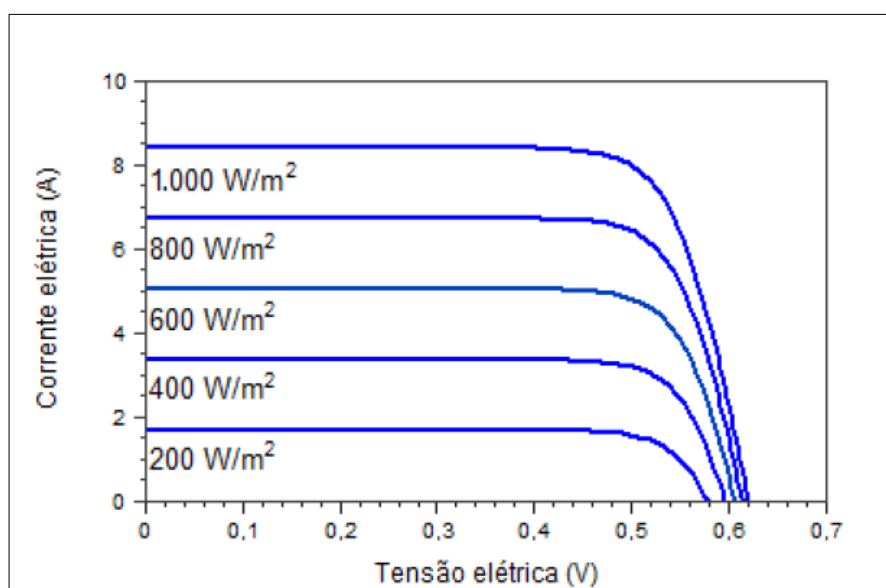


Figura 4.10 - Influência da radiação solar na curva (I-V)

- Orientação e inclinação dos painéis fotovoltaicos

A orientação e inclinação dos módulos, são estabelecidas de modo a obter a melhor condição quanto a produção de energia elétrica ao longo do ano, ou seja, considerando as posições da terra e do sol ao longo do ano, conforme ilustrado.

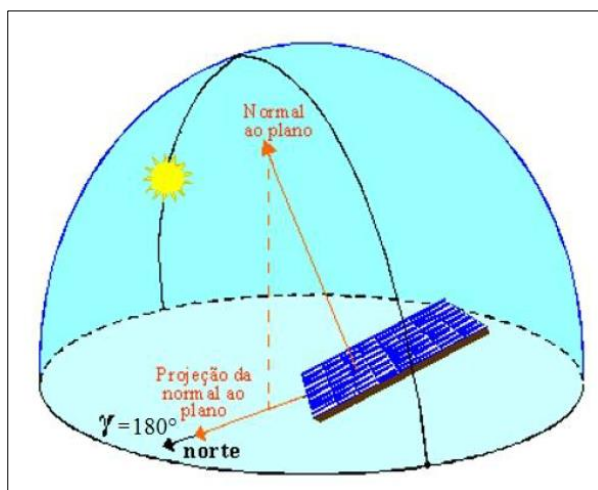


Figura 4.11 - Orientação dos Painéis Fotovoltaicos

Como regra prática a tabela abaixo estabelece a melhor inclinação de um painel fotovoltaico dependendo do local da instalação.

<i>Latitude geográfica do local</i>	<i>Ângulo de inclinação recomendado</i>
<i>0° a 10°</i>	<i>Inclinação = 10°</i>
<i>11° a 20°</i>	<i>Inclinação = latitude</i>
<i>21° a 30°</i>	<i>Inclinação = latitude + 5°</i>
<i>31° a 40°</i>	<i>Inclinação = latitude + 10°</i>
<i>41° ou mais</i>	<i>Inclinação = latitude + 15°</i>

Tabela 4.2 – Ângulo de inclinação dos painéis Fv x latitude

4.3. Tipos de sistemas fotovoltaicos

- Isolados da rede (off-grid)

Os sistemas isolados da rede, também chamados autônomos, são empregados em locais não atendidos por uma rede de distribuição de eletricidade. Podem ser usados para fornecer energia para residências, iluminação de estradas, suprimento de energia para sistema de proteção catódica de gasodutos, oleodutos, sistemas de telecomunicações, etc.

Estes sistemas são compostos pelos painéis fotovoltaicos, controlador de carga, baterias e inversor de frequência quando as cargas são em corrente alternada.

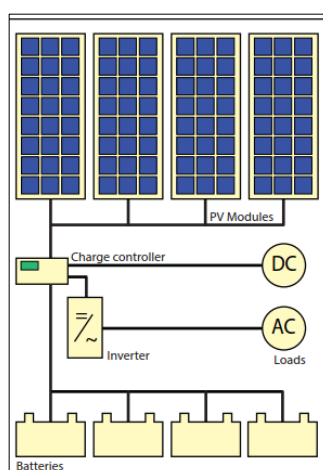


Figura 4.12 - Sistema Fv Off-Grid
Fonte: *Delft University*

- Sistemas bombeamento de água

A aplicação de sistemas fotovoltaicos para fornecer energia ao eixo da bomba através de gerador fotovoltaico se caracteriza em um sistema simples e muito vantajoso.

Estes sistemas consistem em transferir água (bombear) de uma lagoa de contenção para as plantações por exemplo, locais geralmente fora da malha de suprimento de eletricidade, o que o torna muito importante.

A energia gerada passa por um inversor CC/CA que alimenta a moto bomba, e o

excedente fica armazenado na bateria. Esta bateria tem a finalidade de suprir uma demanda momentânea para acionamento do eixo da bomba. Podemos ter os sistemas ainda mais simples, que são aqueles que funcionam somente nas horas de sol, o que o torna ainda mais viável, sem utilização da bateria e acionando diretamente a bomba.

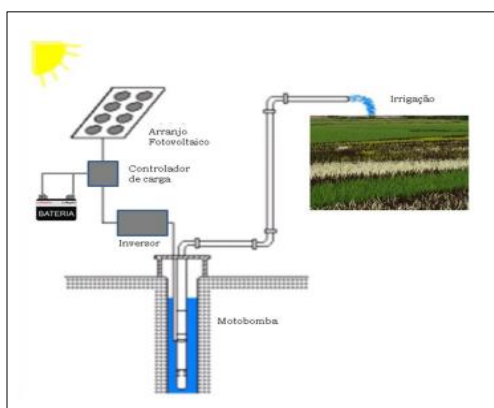


Figura 4.13 - Sistema FV para bombeamento de água

- Sistemas conectados à rede elétrica (On-grid)

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser centralizados, constituindo usinas de geração de eletricidade, micro ou mini geradores para qualquer tipo de consumidor.

A implantação deste tipo de sistema se tornou possível a partir da publicação da resolução normativa 482, em 17 de abril de 2012 com o módulo ANEEL com a regras, tornando público para o setor de energia renováveis e cogeração qualificada no Brasil o processo e requisitos para acesso às redes das distribuidoras para os micros e minigeradores distribuídos.

- Diagrama do sistema fotovoltaico conectado à rede

Esses sistemas não utilizam armazenamento de energia, pois toda ou parte da energia gerada durante o dia é entregue à rede e, durante a noite ou em períodos nublados, dela é extraída a energia necessária para alimentar as cargas. Fazendo

analogia aos sistemas isolados, a bateria neste caso é a própria rede de distribuição.

O sistema conectado à rede é composto pelos painéis fotovoltaicos, inversor CC/CA, quadro de distribuição do prédio para injetar a corrente gerada e alimentar as cargas e um medidor bidirecional, para medir a energia exportada e consumida.



Figura 4.14 – Diagrama de um SFCR típico

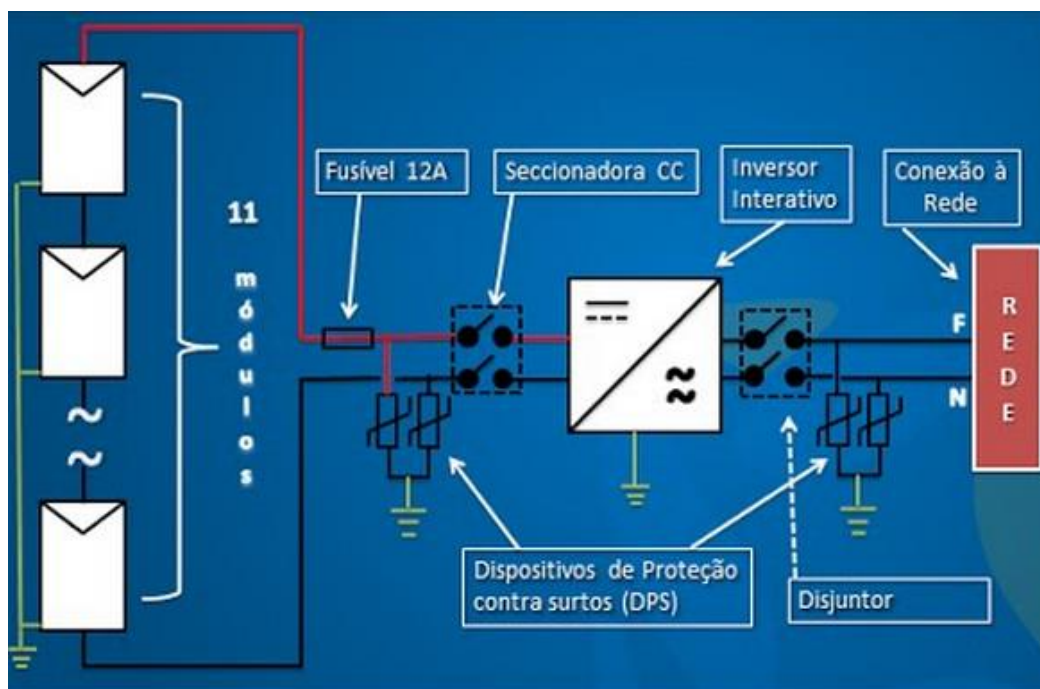


Figura 4.15 - Diagrama multifilar de proteções elétricas - SFCR

Neste diagrama multifilar ilustramos as proteções estabelecidas na resolução 482, que são:

- Fusível por string (linha de módulos em série);
- Dispositivo de proteção contra surtos a montante do inversor.
- Seccionadora corrente contínua;
- Disjuntor na saída do inversor (corrente alternada);
- Dispositivo de proteção contra surtos a jusante do inversor.

- Sistema híbrido

Estes sistemas são aplicados com a falta de acesso à rede elétrica, com a finalidade de suprir uma demanda pontual e com poucos usuários, normalmente por um motor de combustão interna e outra fonte alternativa.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede e a cogeração utilizando motor de combustão interna, apresentam vários pontos de sinergia, tais como, limitar a potência do motor com a energia térmica demandada e complementar o consumo de energia elétrica com um gerador fotovoltaico, sendo esta a estratégia utilizada no presente estudo de caso.

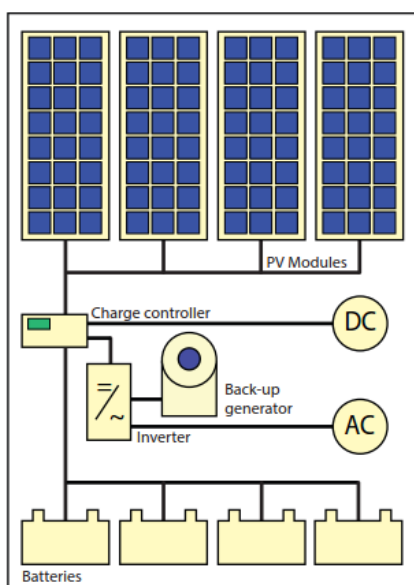


Figura 4.16 - Sistema híbrido
Fonte: Delft University

5. Legislação: cogeração e geração fotovoltaica;

5.1. Legislação da Cogeração

A cogeração como discutido anteriormente, gera energia térmica para utilização no local e também energia elétrica, que pode ser consumida pela instalação ou não.

A comercialização da energia elétrica está contida em dois ambientes, o regulado, utilizado pelas distribuidoras de energia elétrica e o ambiente livre, que trata a comercialização entre produtor e consumidor.

A legislação a seguir insere em ordem cronológica a cogeração no contexto da geração da energia elétrica, qualificação quanto a eficiência energética, a conexão com a rede do sistema integrado nacional, comercialização dos excedentes, compensações, transmissão e distribuição da energia elétrica não consumida no local da geração. A figura mostra o fluxo de comercialização da energia elétrica utilizado pela CCEE.

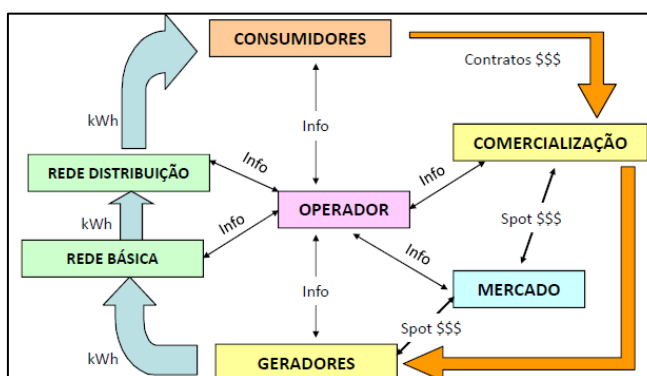


Figura 5.1 – Fluxos físicos e comerciais CCEE
Fonte: Manual Geração Distribuída, Prof. R. Castro

- Marco inicial da legislação para a cogeração

A legislação inicial da cogeração é de 1995, lei 9.074, regulamentada pelo Decreto 2.003 de 1996. Neste momento foram inseridas as figuras do autoprodutor e do produtor de energia elétrica independente. Esta estrutura foi regulamentada pela resolução ANEEL 281 de 1999 que definiu regras para acesso aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.

- Política energética nacional

A lei 9.478 de 1997, estabelece a política energética nacional trazendo as diretrizes para uso racional de energia, incluindo fontes alternativas. A lei 10.848 de 2004,

dispõe sobre comercialização de energia elétrica, complementa a lei 9.478 de 1997 entre outras.

- Comercialização da energia elétrica

Em 2004, o decreto 5.163 regulamenta as regras gerais para comercialização da energia elétrica e o processo de outorga de concessões e autorizações de geração de energia elétrica. Este decreto estabelece um novo modelo para a comercialização da energia elétrica, através da criação do ambiente de contratação regulada (ACR) e ambiente de contratação livre (ACL). Também em 2004 é criada a CCEE (câmara de comercio de energia elétrica) a partir do MAE (mercado atacadista de energia elétrica).

- Principais atribuições da CCEE (fonte: <https://www.ccee.org.br>)

- Implantar e divulgar regras e proc. de comercialização de energia elétrica
- Fazer gestão dos contratos de ambiente regulado e livre;
- Manter registro de dados de energia gerada e consumida;
- Realizar leilões de compra e venda ambiente regulado;
- Realizar leilões de energia de reserva;
- Apurar infrações cometidas pelos agentes de mercado;
- Servir como fórum de discussões de ideias para desenv.do mercado;

- Regulamentações ANEEL com base na legislação

- Resolução ANEEL 21/2000

A ANEEL estabeleceu os requisitos necessários à qualificação de centrais cogeradores de energia e dá outras providências, sendo revogada em 2006 pela RN 235.

- Resolução Normativa 77, 2004

A ANEEL Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30.000Kw.

- Resolução Normativa 167, 2005

A ANEEL estabelece as condições para a comercialização de energia proveniente de Geração Distribuída. Esta RN trata também dos seguintes pontos:

- Da separação de geração e transmissão, quando desenvolvidas por concessionária, permissionária ou autorizada de serviço público de distribuição de energia elétrica que atue no Sistema Interligado Nacional – SIN;
- Da energia proveniente de empreendimentos de geração distribuída que será considerada para fins de atendimento da totalidade do mercado das concessionárias, permissionárias ou autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica, e que foram estabelecidas condições especiais para essa comercialização, de acordo com o Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004; e

- Resolução Normativa 235, 2006

Esta resolução revoga a RN 21/2000, que trata dos requisitos para a qualificação de centrais cogeneradoras de energia e outras providências.

- Resolução Normativa 247 de 2006

Esta resolução estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências.

- Resolução Normativa 390, 2009

Esta resolução estabelece os requisitos necessários à outorga de autorização para exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes alternativas de energia, os procedimentos para registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida e dá outras providências., tais como:

- Outorga para exploração das centrais geradoras com potência superior a 5.000 kW poderá ser requerido à ANEEL,
- Terá como finalidade, dentre outras, permitir que o agente interessado solicite a informação de acesso às concessionárias de distribuição ou ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS;

- Estabelece a necessidade para licenças e/ou autorizações sejam solicitadas aos órgãos responsáveis pelo licenciamento ambiental e pela outorga de recursos hídricos e demais órgãos públicos federais, estaduais, municipais ou do Distrito Federal

- Resolução Normativa 482, 2012

Esta RN estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e criou o sistema de compensação de energia elétrica correspondente. E com o objetivo de reduzir os custos e o tempo para a conexão das micros e minigerações, compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa nº 414/2010), aumentar o público alvo e melhorar as informações na fatura, a ANEEL realizou a Audiência Pública nº 26/2015 (de 7/5/2015 a 22/6/2015) que culminou com a publicação da Resolução Normativa - REN nº 687/2015, a qual revisou a REN nº 482/2012 e a seção 3.7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL).

5.2. Legislação da Geração Fotovoltaica no Brasil

A geração fotovoltaica tem apresentado um significativo crescimento no mundo. Até o início do século, a utilização era predominantemente em sistema isolados da rede de distribuição, e hoje a mudança experimentada é total, estando com mais de 95% dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Este grande crescimento foi fruto de legislação compatível e incentivos à geração fotovoltaica, na Alemanha, China, Espanha, EUA, dentre outros. Como já discutido anteriormente, o forte desenvolvimento forçou os preços para baixo e com projeção ainda mais acentuada para as próximas décadas.

- Lei 10.848, 2004

A Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, prevê a possibilidade de as distribuidoras de energia garantirem a contratação da totalidade do mercado também por energia proveniente de geração distribuída.

- Decreto 2.653, 2004

Este decreto detalha o modelo de contratação de geração distribuída pelas distribuidoras conforme regulamentação da lei 10.848, 2004

- Resolução normativa 482, 2012

Em 2012 a ANEEL dá um passo adiante publicando a resolução normativa ANEEL 482, que estabelece as condições e requisitos para acesso as redes de distribuição de energia elétrica para os micros e minigeradores distribuídos. Nesta mesma resolução cria um sistema de compensação de energia.

O gerador próprio que também é um consumidor, utilizando tecnologia fotovoltaica, eólica, biomassa, cogeração qualificada ou pequena central hidrelétrica, exporta a energia excedente para a rede da concessionária e utiliza essa energia para compensar o consumo da unidade ou de outra sendo do mesmo titular.

A legislação até então da abertura somente para a contratação de geração distribuída de agentes concessionários, não prevendo a compra de excedente de unidades consumidoras conectadas a rede de distribuição.

- Resolução normativa 687, 2015

Esta resolução altera definições e parâmetros estabelecidos da RN 482, experimentando mais um importante avanço para a geração distribuída no Brasil.

- Principais alterações da RN 482 (2012) para RN 687(2015)

Item	Aspecto	Resolução Normativa 482, 2012	Resolução Normativa 687, 2015
1	Microgeração	Potência até 100 KW	Potência até 75 KW
2	Minigeração	Potência de 100 KW até 1 MW	Potência de 75 KW até 5 MW Para fontes hidráulicas até 5 MW
3	Sistema de compensação do excedente injetado na rede	Compensar no prazo máximo de 36 meses para local de geração ou outro com mesmo titular na mesma distribuidora	Compensar no prazo máximo de 60 meses para local de geração ou outro com mesmo titular na mesma distribuidora
4	Múltiplo consumidores	Não existia	Incluídos único empreendimento de geração com múltiplos consumidores
5	Geração compartilhada	Não existia	Incluído para consórcio, associação ou cooperativa
6	Liberação de acesso pela distribuidora	Prazo máximo de 82 dias	Prazo máximo de 34 dias

Tabela 5.1 – Principais alterações da RN 482

6. Estudo de caso: COGERAÇÃO e SFCR em hospital de pequeno porte

O segmento hospitalar tem uma operação e gestão nada simples. Novas exigências são demandadas tanto pela competição quanto pelas agências reguladoras, assim como a constante pressão por custos, que exige controles operacionais e atenção para alternativas de redução de custos, de forma a manter a operação confiável e equilibrada financeiramente.

A geração distribuída aparece como uma opção importante no planejamento estratégico do segmento hospitalar, na busca de recursos energéticos confiáveis.

A concepção do estudo condiciona a avaliação de 4 cenários, podendo ser uma solução isolada ou uma cogeração como parte de uma solução, em conjunto com um sistema de geração fotovoltaica. Vencida esta etapa, planejamos dimensionar o gerador fotovoltaico e em seguida as plantas de cogeração para os cenários 2, 3 e 4.

Na etapa de análise estaremos também comparando os cenários estabelecidos no capítulo 2 (análise da questão), que são:

- Cenário 1: geração fotovoltaica limitada a área de telhado – energia elétrica;
- Cenário 2: cogeração limitada a demanda de água quente – energia elétrica e água quente;
- Cenário 3: solução integrando o cenário 1 + cenário 2 – energia elétrica e água quente;
- Cenário 4: cogeração para gerar a totalidade da energia elétrica, totalidade de água quente e parte da água gelada;

Este capítulo tratará das instalações, demandas, estudo técnico para os 4 cenários, comparação da viabilidade para cada proposta e por final definir e simular upsides com alguma probabilidade de ocorrência para a melhor solução estudada.

6.1. Instalações e demandas

Neste capítulo organizamos as informações gerais disponíveis para o estudo de caso, que envolve uma geração composta por gerador fotovoltaico e cogeração a gás natural. Ilustramos abaixo uma vista aérea do hospital.



Figura 6.1 - Vista aérea hospital

Fonte: Google Map

- Descrição das instalações

Descrevemos as instalações levantadas no local e aquelas obtidas junto a equipe de manutenção e gestão do hospital:

- Ar condicionado: 250 unidades elétricas autônomas de 12.000 BTU.
- Prédio radioterapia com alimentação de energia elétrica independente;
- Dois geradores de emergência, 250 e 150 KVA diesel;

- Suprimento energia elétrica:

Cabine de media tensão: 13.800 Volts – para 90 % das cargas;

Entrada baixa tensão: 380 Volts – radioterapia (10% carga total)

- Iluminação: conforme arquitetura dos prédios;
- Água quente: aquecedores e chuveiros elétricos no local de consumo;
- Restaurante com sistema de gás liquefeito dedicado para cocção;

- Demandas do hospital

- Energia elétrica

- Consumo médio anual: 2.085 MWh/ano;
- Demanda contratada: 340 KW ponta e 400 kW fora de ponta;
- Tarifa A4 azul, comercial, CPFL;
- Bandeira tarifária considerada: verde
- Expectativa: redução da conta em 50%;

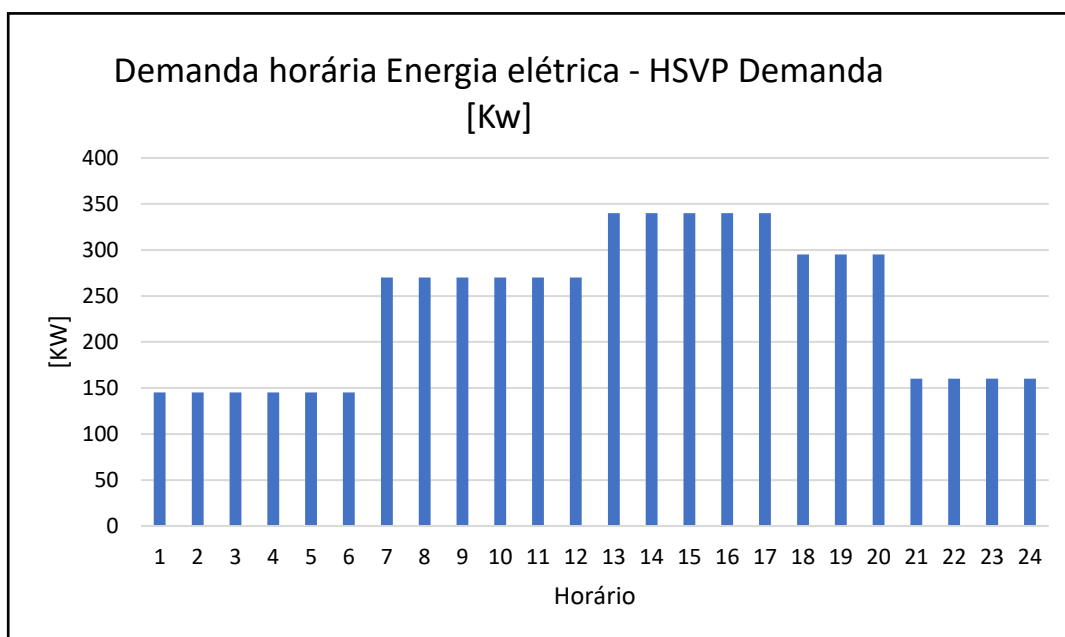


Figura 6.2 – Gráfico da demanda energia elétrica

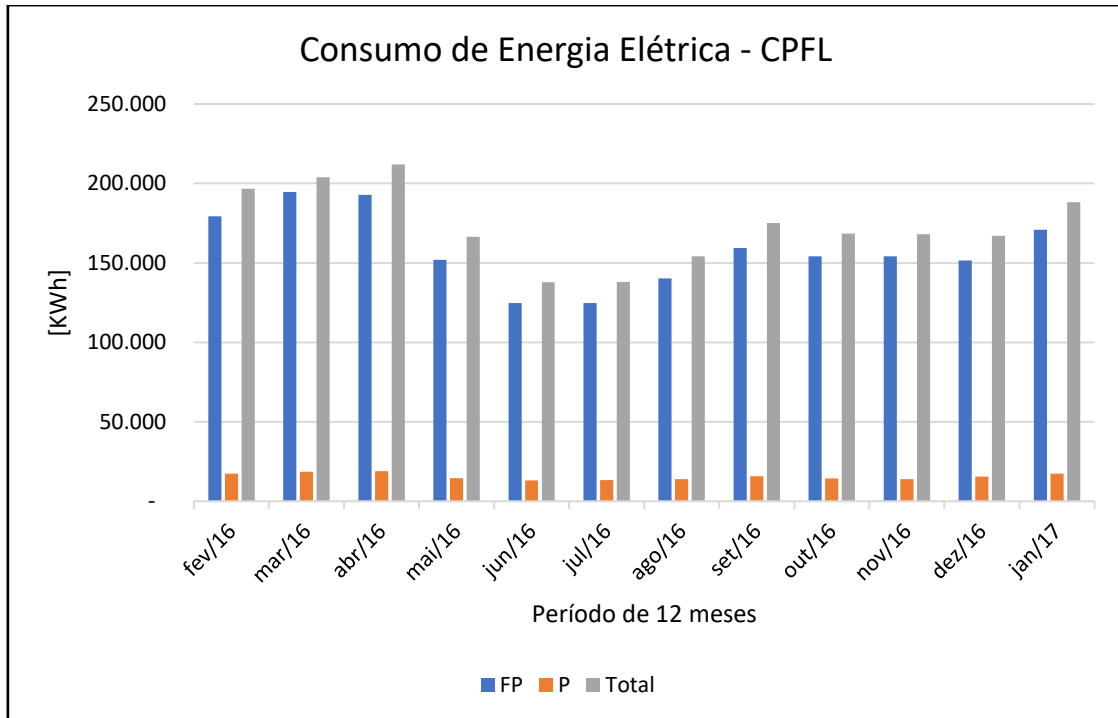


Figura 6.3 – Gráfico de consumo energia elétrica

○ Demanda térmica - água quente

- Chuveiros elétricos: quartos e funcionários

Estimado 300 banhos por dia;

Potência média unitária: 4000 Watts

Tempo estimado por banho: 10 min/banho;

Vazão estimada por chuveiro: 10 litros/min;

Volume dia = $300 \times 10 \times 10 = 30.000$ litros/dia

Consumo e elétrica = $4 \times (10/60) \times 300 = 200$ KWh/dia

- Lavatórios e demais usos: estimado 15.000 lts /dia

Volume total água quente:

$30.0 + 15.000 = 45.000$ litros / dia

Perdas e variação consumo de 30% = 60.000 litros/dia

Temperatura armazenamento: 60° C

Temperatura água fria: 20 ° C

- Cálculo da energia térmica requerida da cogeração

Premissa: cogeração operando um mínimo 12 horas por dia

$$Q = mcp (T_{\text{quente}} - T_{\text{fria}}) >$$

$$m = 60.000 \text{ litros/dia} = 60.000 [\text{kg/dia}]/12[\text{hs/dia}] = 5.000 \text{ kg/h}$$

$$cp = 1 \text{ Kcal / Kg}^{\circ}\text{C}$$

$$Q [\text{Kcal/h}] = 5.000 [\text{kg/h}] \times 1[\text{Kcal/kg}^{\circ}\text{C}] \times (60-20) [^{\circ}\text{C}]$$

$$Q (\text{demanda térmica horária máxima}) = \mathbf{200.000 \text{ Kcal/h}}$$

$$\text{Demanda térmica diária: } \mathbf{2.400.000 \text{ Kcal/h}}$$

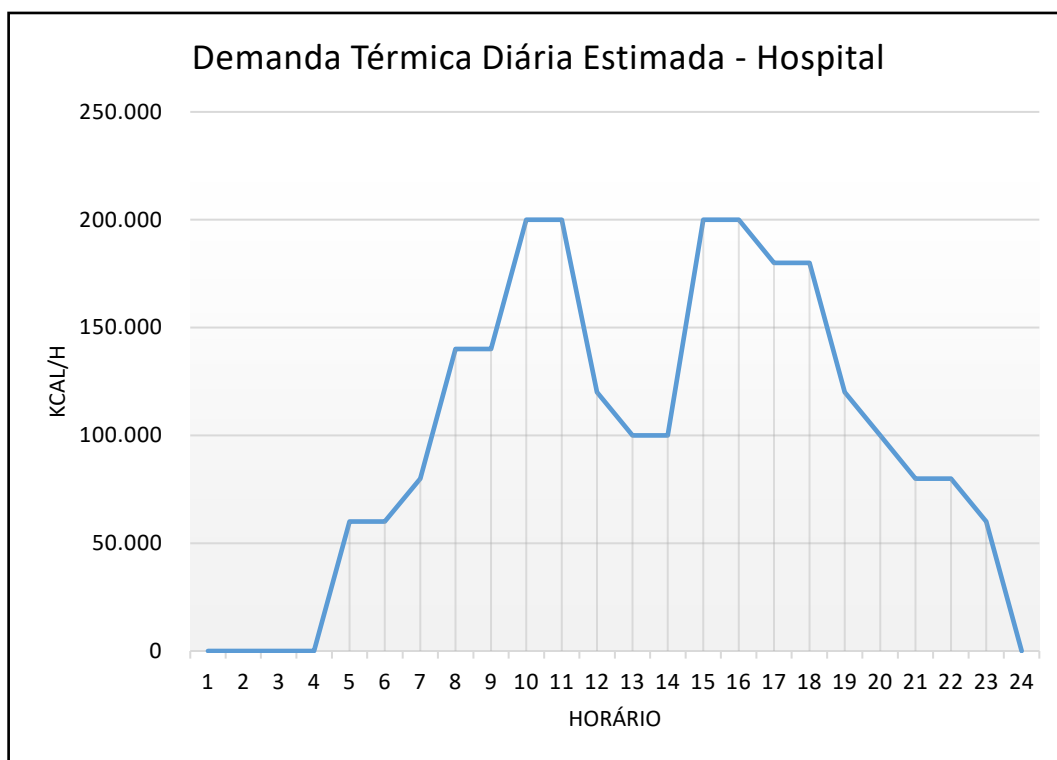


Figura 6.4 – Gráfico de demanda térmica do hospital

6.2. Cenário 1: Concepção do gerador fotovoltaico conectado à rede

A concepção do gerador fotovoltaico leva em conta a disponibilidade de áreas com exposição à radiação solar e sem efeitos nocivos a produção de energia elétrica fora do aceitável.

Claro que o consumo do hospital também é fator importante, mas em nosso caso não é relevante, visto que o gerador fotovoltaico ocupando toda a área de exposição disponível deverá produzir ao longo do ano nada além de 10% do consumo anual de energia elétrica da unidade, por isso usaremos o máximo de área possível.

São duas as conexões do sistema elétrico do hospital com à rede da CPFL, sendo uma em média e outra em baixa tensão. Desta feita, ficou estabelecido a entrada em média tensão para injetar a energia elétrica produzida pela cogeração e a conexão de baixa tensão para conectar o sistema fotovoltaico.

- Relatório técnico do gerador fotovoltaico

DADOS DA LOCALIZAÇÃO HOSPITAL	
Localidade:	Rua São V. de Paulo 223, Jundiaí, SP
Latitude:	-023°-11'-02"
Longitude:	-046°-53'-22"
Altitude:	661 m
Fonte dados climáticos:	CRESESB

Tabela 6.1 – Localização geográfica do hospital

DIMENSIONAMENTO GERADOR FOTOVOLTAICO

A quantidade de energia produzida foi calculada com base nos dados radiométricos disponibilizados pelo CRESESB e métodos de cálculo descritos nas normas e boas práticas da engenharia.

DESCRIÇÃO DO GERADOR FOTOVOLTAICO

O gerador é composto por 336 módulos fotovoltaicos e 4 inversores. A potência nominal total é de 107,5 KWp para uma produção anual de 157,4 MWh, distribuídos em uma área de 700 m² de telhado. A modalidade de conexão à rede de alimentação é de baixa tensão, trifásica, 380 Vac.

IMPACTOS AMBIENTAIS

A tabela abaixo simula os ganhos ambientais comparado com a redução do consumo da energia da rede produzida pelas térmicas brasileiras conectadas no sistema integrado nacional (SIN). Utilizamos como base a geração total de energia elétrica no Brasil no ano de 2014. A produção total foi de 590.479×10^3 MWh, sendo 131.128×10^3 MWh gerado nas térmicas à combustíveis fósseis. Essa geração das térmicas brasileiras de 2014 era composto por: térmicas a carvão com 14%, a derivados de petróleo 24% e a gás natural 62%.

- **Cálculo da emissão de CO₂/MWh** pelas térmicas, proporcional para cada combustível primário, tomando por base o “Anuário Estatístico da EPE 2015 (base 2014).
 - Emissão de CO₂ nas térmicas: 71×10^6 tons de CO₂ em 2014
 - Matriz brasileira total (renováveis + fósseis) = 71×10^6 tons CO₂ / 590.479×10^3 MWh = 0,1202 tons CO₂/MWh
 - Fósseis: Tons CO₂/MWh em 2014 = 71×10^6 tons CO₂ / 131.128×10^3 MWh = **0,54 tons CO₂/MWh**
 - Redução da emissão de CO₂ com a geração FV = $157,4 \text{ MWh} \times 0,54$ = **85,0 toneladas de CO₂** com a geração fotovoltaica anual
- **Cálculo da redução de emissão de SO₂/MWh**
 Com o gerador FV em comparação com as térmicas brasileiras, proporcional para cada combustível (EPE 2014) e com base nas emissões do relatório “*Energy and Air Pollution – WEO – Special Report – 2016 - Global Average Emissions Factors and Share of Major Pollutant Emissions by Fuel, 2015* “

- Térmicas à carvão mineral (coal): 10 Kt/Mtoe
 Como: 1 MWh = 0,086 toe (conforme estatística IEA)
 Logo: 1 Mtoe = $10^6 \text{toe} \times 1 \text{ MWh}/0,086\text{toe} = 11,63 \times 10^6 \text{ MW}$
 Portanto: $10 \times 10^6 \text{kg} / 11,63 \times 10^6 \text{MWh} = 0,86 \text{ Kg SO}_2/\text{MWh}$
- Térmicas à derivados de petróleo (oil): 6 Kt/Mtoe
 $= 6 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,52 \text{ Kg SO}_2/\text{MWh}$
- Térmicas a gás natural (NG): 0Kt/Mtoe = 0,00Kg SO₂/MWh
- Calculo Kg SO₂/MWh na geração térmica brasileira = $(14\% \times 0,86) + (24\% \times 0,52) + (62\% \times 0,00) = 0,25 \text{ Kg SO}_2/\text{MWh}$
- Redução da emissão de SO₂ com a geração FV = $157,4 \text{ MWh} \times 0,25 = \mathbf{39,4 \text{ Kg de SO}_2 \text{ por ano}}$

- **Cálculo da redução da emissão de NOx**

A redução é função do consumo da rede, com consequente redução da produção nas térmicas operadas com combustíveis fósseis, proporcional para cada combustível (EPE 2014) e os dados das emissões por fonte fóssil conforme relatório “*Energy and Air Pollution – WEO – Special Report – 2016 - Global Average Emissions Factors and Share of Major Pollutant Emissions by Fuel, 2015*”

- Térmicas à carvão mineral (coal): 5Kt / Mtoe
 $= 5 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,43 \text{ Kg NO}_x/\text{MWh}$
- Térmicas à derivados de petróleo (oil): 17 Kt/Mtoe;
 $= 17 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 1,46 \text{ kg NO}_x/\text{MWh}$
- Térmicas a gás natural (NG): 3 Kt/Mtoe
 $= 3 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,26 \text{ Kg NO}_x/\text{MWh}$
- Calculo Kg NO_x/MWh para a geração térmica brasileira = $(14\% \times 0,43) + (24\% \times 1,46) + (62\% \times 0,26) = \mathbf{0,57 \text{ Kg NO}_x/\text{MWh}}$
- Redução da emissão de NO_x com a geração FV = $157,4 \text{ MWh} \times 0,57 = \mathbf{89,7 \text{ Kg de NO}_x \text{ por ano}}$

Consideramos como premissa que o suprimento da rede integrada é efetuado pelas usinas renováveis na base e as térmicas operando na margem para completar a

demanda nacional. As usinas térmicas, operadas com combustíveis fósseis, terão suas produções reduzidas na proporção da produção local.

- Ganhos ambientais com o gerador fotovoltaico

Redução dos impactos ambientais: valores anuais	
Dióxido de carbono (CO ₂)	85,0 tons/ano de operação
Dióxido de enxofre (SO ₂)	39,4 kg / ano de operação
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	89,7 kg / ano de operação

Tabela 6.2 – Ganhos ambientais com o gerador fotovoltaico

TABELA DE RADIAÇÃO NO PLANO HORIZONTAL

A avaliação do recurso solar baseado em dados históricos das imediações de Jundiaí, SP, conforme CRESESB.

Mês	Total diário [MJ/m ²]	Total mensal [MJ/m ²]
Janeiro	19,98	619,38
Fevereiro	19,33	541,24
Março	18,58	575,98
Abril	17,50	525,00
Maio	14,47	448,57
Junho	13,97	419,10
Julho	14,98	464,38
Agosto	17,46	541,26
Setembro	17,93	537,90
Outubro	20,41	632,71
Novembro	21,64	649,20
Dezembro	20,59	638,29

Tabela 6.3 – Radiação solar no plano horizontal

EXPOSIÇÕES PROJETADAS

O gerador projetado está distribuído em duas (02) exposições

	Tipo de instalação	Orientação – em relação ao Sul	Inclinação	Sombras *
Exposição 1 - NE	Ângulo fixo	-123°	25°	0 %
Exposição 2 - NW	Ângulo fixo	147°	25°	0 %

Tabela 6.4 – Exposições gerador fotovoltaico

***Nota:** avaliado risco sombreamento para os 12 meses do ano, e nada foi identificado.

DIAGRAMA DE RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIO [KWH/M²] – EXPOSIÇÃO 1

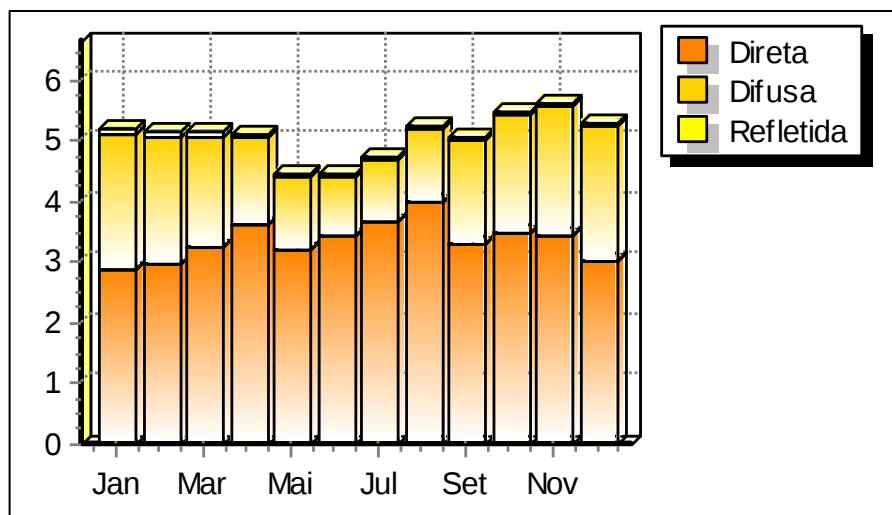


Figura 6.5 – Diagrama de radiação solar diário - exposição 1

TABELA DE RADIAÇÃO SOLAR – PLANO INCLINADO 25° - EXPOSIÇÃO 1

Mês	Radiação direta [kWh/m ²]	Radiação difusa [kWh/m ²]	Radiação refletida [kWh/m ²]	Total das diárias [kWh/m ²]	Total mensal [kWh/m ²]
Janeiro	2,895	2,207	0,070	5,173	160,352
Fevereiro	2,987	2,077	0,067	5,131	143,669
Março	3,232	1,829	0,065	5,126	158,899
Abril	3,608	1,440	0,061	5,109	153,271
Maio	3,200	1,197	0,050	4,448	137,875
Junho	3,414	1,002	0,049	4,464	133,934
Julho	3,678	1,011	0,052	4,741	146,984
Agosto	3,983	1,213	0,061	5,257	162,955
Setembro	3,308	1,675	0,062	5,046	151,382
Outubro	3,479	1,936	0,071	5,487	170,083
Novembro	3,439	2,114	0,076	5,628	168,853
Dezembro	2,998	2,222	0,072	5,292	164,041

Tabela 6.5 – Radiação solar no plano inclinado – exposição 1

ESTRUTURAS DE AOPIO E SUPORTE PARA TELHADOS

Os módulos serão montados em suportes de aço galvanizado, acompanhando a inclinação do telhado. Os sistemas de fixação da estrutura deverão resistir a rajadas de vento, com velocidade de até 120 km / h.

DIAGRAMA DE RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIO [KWH/M²] – EXPOSIÇÃO 2

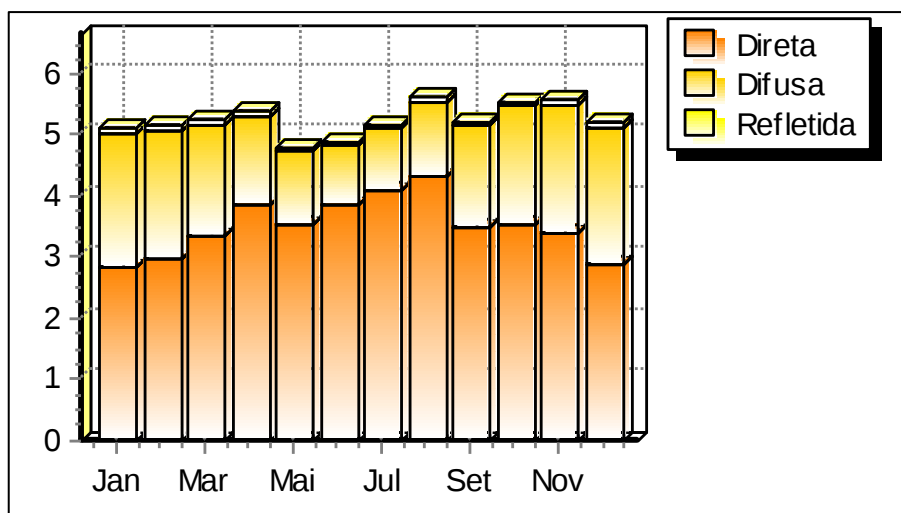


Figura 6.6 – Diagrama de radiação solar diário - exposição 2

TABELA DE RADIAÇÃO SOLAR – PLANO INCLINADO 25° - EXPOSIÇÃO 2

Mês	Radiação direta [kWh/m ²]	Radiação difusa [kWh/m ²]	Radiação refletida [kWh/m ²]	Total das diárias [kWh/m ²]	Total mensal [kWh/m ²]
Janeiro	2,819	2,207	0,07	5,096	157,991
Fevereiro	2,986	2,077	0,067	5,13	143,647
Março	3,336	1,829	0,065	5,23	162,127
Abril	3,864	1,44	0,061	5,365	160,96
Maio	3,537	1,197	0,05	4,785	148,322
Junho	3,833	1,002	0,049	4,884	146,506
Julho	4,1	1,011	0,052	5,163	160,059
Agosto	4,32	1,213	0,061	5,593	173,39
Setembro	3,463	1,675	0,062	5,201	156,032
Outubro	3,511	1,936	0,071	5,518	171,071
Novembro	3,367	2,114	0,076	5,557	166,71
Dezembro	2,896	2,222	0,072	5,19	160,893

Tabela 6.6 – Radiação solar no plano inclinado - exposição 2

ESPECIFICAÇÃO DO SFCR - CENÁRIO 1

O gerador é composto por 336 módulos fotovoltaicos de silício policristalino de 320 Wp, com uma vida útil estimada de mais de 25 anos e perda de produção devido ao envelhecimento estimada em 0,7 % ao ano, com base na documentação técnica do fabricante do painel fotovoltaico.

CARACTERÍSTICAS DO GERADOR FOTOVOLTAICO	
Número de módulos:	336 unidades
Número de inversores:	4 unidades
Potência nominal:	107, 5 Kwp

Tabela 6.7 – Características do gerador fotovoltaico

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS MÓDULOS	
Fabricante:	CSI CANADIAN SOLAR INC
Sigla:	CS6X CS6X-320P
Tecnologia de const.:	SILÍCIO POLICRISTALINO
Características elétricas	
Potência máxima:	320 WP
Rendimento:	16,7 %
Tensão nominal:	36,8 V
Tensão em aberto:	45,3 V
Corrente nominal:	8,7 A
Corr. de curto-circuito:	9,3 A
Dimensões	
Dimensões:	982 MM x 1954 mm
Peso:	22 KG

Tabela 6.8 – Características dos módulos fotovoltaicos

DADOS TÉCNICOS DO INVERSOR	
Fabricante:	FRONIUS INTERNATIONAL
Modelo	ECO 25.0-3-S ECO
Rastreador	1
Entradas por rastreador	6
Características elétricas	
Potência nominal	25 kW
Potência máx rastreador	25 kW
Tensão nominal	650 V
Tensão máxima	1000 V
Corrente máxima	44,2 A
Rendimento	0,98

Tabela 6.9 – Dados técnicos dos inversores

Inversor 1	MPPT 1
Módulos em série	21
Conjunto de módulos em paralelos	4
Exposições	Exposição 1
Tensão MPPT (STC) / N° módulos	736 V / 84
Inversor 2	MPPT 1
Módulos em série	21
Conjunto de módulos em paralelos	4
Exposições	Exposição 1
Tensão MPPT (STC)/ N° de módulos	736 V / 84
Inversor 3	MPPT 1
Módulos em série	21
Conjunto de módulos em paralelos	4
Exposições	Exposição 1
Tensão MPPT (STC) / N° de módulos	736 V / 84
Inversor 4	MPPT 1
Módulos em série	21
Conjunto de módulos em paralelos	4
Exposições	Exposição 2
Tensão MPPT (STC) / n° de módulos	736 V / 84

Tabela 6.10 – Dados técnicos das Strings

DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

FDI=Pot. Nominal do Inversor/potência nominal gerador fotovoltaico

$$FDI = [25.000 / (84 \times 320)] = 0,93$$

CALCULO DA ENERGIA PRODUZIDA

P. Gerador = P módulos x N° módulos = 320 W x 336 = 107,5 KWp

Exposição	N° módulos	Radiação solar [kWh/m ²] ano	Energia ano [kWh]
Exposição 1	252	1.862,60	149.795,00
Exposição 2	84	1.907,71	51.140,95

Tabela 6.11 – Geração de energia bruta por exposição

Energia líquida = Energia x (1-Perdas) = 157.400 kWh = 157,4 MWh/ano

Perdas por efeito de sombreamento	0,00 %
Perda por aumento de temperatura, descasamento conexões, conversão e outras	21,67 %
Perdas totais	21,67 %

Tabela 6.12 – Perdas gerador fotovoltaico

PLANO DO GERADOR FOTOVOLTAICO – CENÁRIO 1

A escolha das faces dos telhados levou em conta a orientação e o agrupamento dos módulos e strings por inversor, minimizando queda de tensão, custos e dificuldades para efetuar as interligações.



Figura 6.7 – Plano do SFCR - cenário 1

DIAGRAMA ELÉTRICO DO SFCR – CENÁRIO 1

O diagrama apresenta o plano gerador, equipamentos e proteções elétricas necessárias para a segurança e operação do gerador.

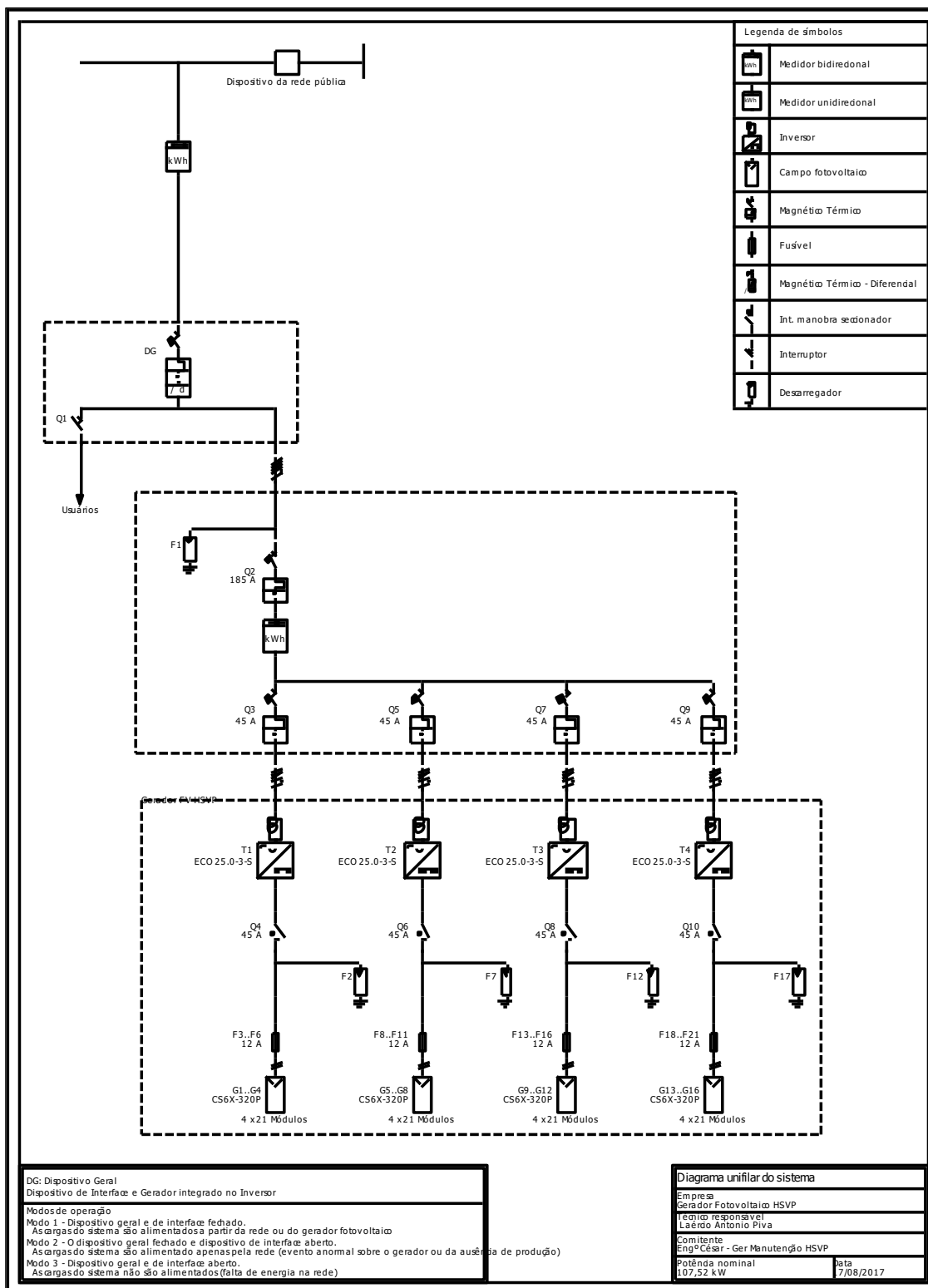


Figura 6.8 – Diagrama elétrico do SFCR - cenário 1

- Relatório econômico SFCR - cenário 1

Este relatório trata das condições econômicas para a instalação de um sistema de produção de eletricidade através da conversão fotovoltaica na cidade de Jundiaí, com potência nominal de 107,5 KWp e energia produzida no primeiro ano de 157.400 kWh.

INVESTIMENTO X ENERGIA PRODUZIDA – SFCR cenário 1

Custo total do gerador sistema instalado	R\$ 424.960,00
Consumo de energia anual:	2.085 MWh/ano
Energia produzida gerador:	157,4 MWh/ano
Energia a ser comprada da CPFL:	1.937,6 MWh/ano
Economia energia	7,6 %

Tabela 6.13 – Investimento x geração de energia SFCR cenário 1

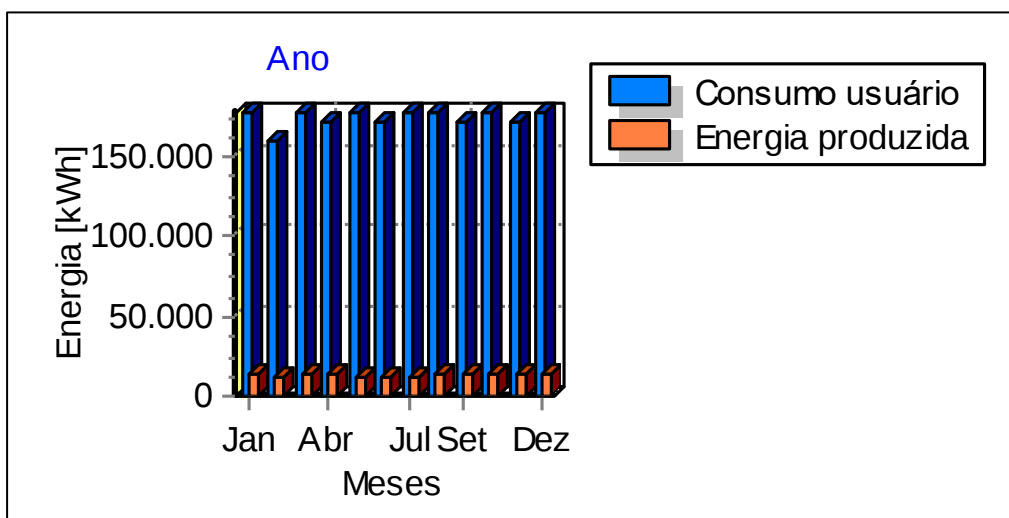


Figura 6.9 – Gráfico da energia produzida x consumo SFCR - cenário 1

RETORNO FINANCEIRO SFCR – CENÁRIO 1

A simulação do desempenho econômico do sistema de geração FV foi calculado para o período de análise de 15 anos, acompanhando a cogeração a gás natural e com os seguintes parâmetros operacionais e financeiros:

Perda de produção devido ao envelhecimento:	0,7 % aa
Taxa de inflação anual:	4,5 % aa
Taxa de juros ativos:	3,5 % aa
Taxa de desconto:	10 % aa
Consumo energia produzida:	100 %
Data fim de análise:	31/12/2032
Capital investido:	R\$ 424.960,00
Período de amortização (anos): Payback simples	6,41
VPL:	R\$ 338.256,86
TIR:	20,06 %

Tabela 6.14 – Premissas x retorno financeiro gerador fotovoltaico – cenário

6.3 Cenário 2: Concepção da cogeração a gás natural de 143 KWe

A primeira premissa utilizada para o dimensionamento da cogeração leva em conta o fato da energia elétrica ser o principal insumo energético, e estar fora de questão a atualização da tecnologia aplicada para o condicionamento dos ambientes, hoje puramente elétrico e para o estudo continuará sendo.

Como segunda condicionante levamos em conta a demanda térmica do hospital (água quente), com previsão de alguma sobra, apenas para suprir a demanda. Este aspecto limitou a potência da cogeração a energia térmica demandada.

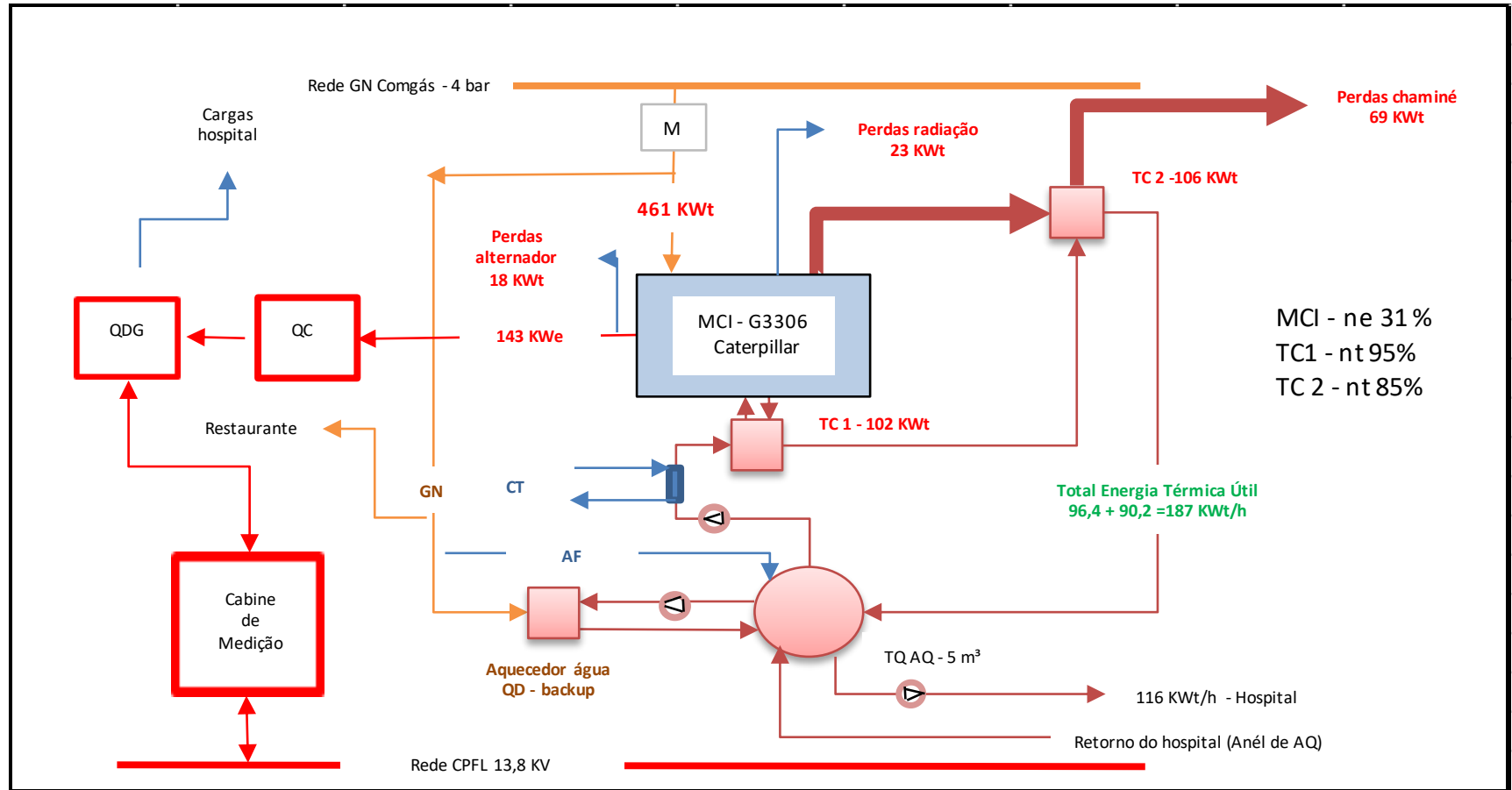
- Cogeração proposta

A luz das premissas do estudo selecionamos um motor da Caterpillar a gás natural com potência compatível para a geração térmica diária para operar 16 horas por dia. Este sistema compensará parcialmente o consumo de eletricidade, cobrindo as 3 horas do horário de ponta de segunda a sexta e 13 horas fora de ponta para os sete dias da semana. Estamos considerando disponibilidade da cogeração de 95%.

O gerador Caterpillar G 3306, 143 KWe, 31,9% rendimento elétrico máximo, a gás natural operando entre 1500 a 1800 RPM.



Figura 6.10 – Motor Caterpillar 143 KWe
Fonte: Caterpillar



Descrição dos Componentes do Diagrama		
Símbolo	Descrição	Comentário
KWh	Medidor energia elétrica bidirecional	Entrada 13,8 KV
QDG	Quadro de distribuição de energia elétrica	380 Volts – 3 fases
QC	Quadro de controle e comando gerador	-
MCI	Motor de combustão interna Caterpillar	143 KWe – efic. 35%
M	Medidor de gás natural	-
TC 1	Trocador bloco do motor (água – água)	Efic. 95 %
TC 2	Trocador gases chaminé (Gases – água)	Efic. 85%
AA-QD	Aquecedor água queima direta GN	Back-up
TQ AQ	Tanque água quente 5 m ³	-

Tabela 6.15 – Descrição dos componentes da planta de cogeração – cenário 2

Nota: O tanque de acumulação de água quente de 5 m³ está prevendo suprir a demanda máxima por uma hora em horário de consumo máximo, até que o sistema de backup seja colocado em marcha ou a cogeração seja retomada. Não estamos prevendo consumo de GN para o aquecimento de água backup.

- Balanço energético cogeração

Motor de 143 KWe, com rendimento efetivo considerado para os cálculos de 31%, operação de 16 horas e 95% de disponibilidade de forma a compensar parte da energia elétrica e a totalidade da energia térmica demandada.

Balanço Energético - MCI G 3306 - Caterpillar				
Descrição	Valores	Unidade	Valores	Unidade
Consumo Gerador:	0,3241	m3/kWh	-	-
Capacidade:	143	kWe	-	-
Vazão horária GN:	46	m3/h	-	-
PCI GN	8.560	kcal/m3	9,9535	KWt/m³
Energia Entra Gerador	396.710	kcal/h	461,3	KWt/h
Energia Térmica Bloco	22%	%	-	-
Eficiência do Trocador	95%	%	-	-
Energia Térmica Bloco Útil	82.912	kcal/h	96,4	KWt/h
Energia Térmica Exaustão	23%	%	-	-
Eficiência do Trocador	85%	%	-	-
Energia Térmica Exaustão Útil	77.557	kcal/h	90,2	KWt/h
Energia Térmica Útil total	160.469	kcal/h	186,6	KWt/h
Geração Térmica AQ - QD	Backup	Emergência	-	-
Geração diária de energia térmica - 16 hs	2.439.130	Kcal/h dia	2.836,2	KWt/dia (95%)
Geração anual de energia térmica	890.282.370	Kcal/h ano	1.035.212,1	KWt/ano
Demanda Diária Térmica AQ	2.400.000	Kcal/h dia	2.790,7	KWt/dia
Demanda anual E. Térmica AQ	876.000.000	Kcal/h ano	1.018.604,7	KWt/ano
Energia térmica diária excedente	39.130	Kcal/h dia	45,5	KWt/dia
Energia térmica anual excedente	14.282.370	Kcal/h ano	16.607,4	KWt/ano

Tabela 6.16 – Balanço energético da cogeração 143 KWe – cenário 2

- Avaliação da qualificação da cogeração a gás natural

Cálculo requisito de qualificação da Cogeração - ANEEL Resol. n° 235 14/11/06

E_f	461 kWh/h				
E_e	143 kWh/h	$40\% = \frac{E_t}{E_f} \geq 15\%$	Cumpre	requisito (a)	
E_t	187 kWh/h				
X	2,14				
F_c	41%	$50\% = \left(\frac{E_t}{E_f} \right) + X + \frac{E_e}{E_f} \geq F_c\%$	Cumpre	requisito (b)	

Cogeração Qualificada ANEEL

- Cálculo do fator de utilização de energia (FUE) da cogeração

Fator de Utilização de Energia - FUE

W	143 kW		
Q_u	187 kW	$FUE = \frac{W + Q_u}{Q_{comb}}$	= 71%
Q_{comb}	461 kW		

6.3. Cenário 3: Concepção de solução integrada: cenário 1 + cenário 2

A solução proposta contempla a implantação de um gerador fotovoltaico de 107,5 KWp e uma unidade de cogeração a gás natural de 143 KWe. A cogeração foi concebida para atender a totalidade da demanda de água quente e compensar parte do consumo de energia elétrica, operando 16 horas por dia, de forma a compensar a conta anual de energia elétrica em 50% dos valores desembolsados, conforme expectativa do cliente.

A análise econômica apresentada tem premissa de 15 anos de operação, taxa de desconto de 10% ao ano (calculado a seguir), juros ativos de 3,5 % ao ano e índice de inflação de 4,5 % ao ano.

- Diagrama de processo para a solução integrada – cenário 3: O fluxograma traz a integração da cogeração de 143 KWe e o sistema fotovoltaico de 107,5 KWp proposto para o hospital.

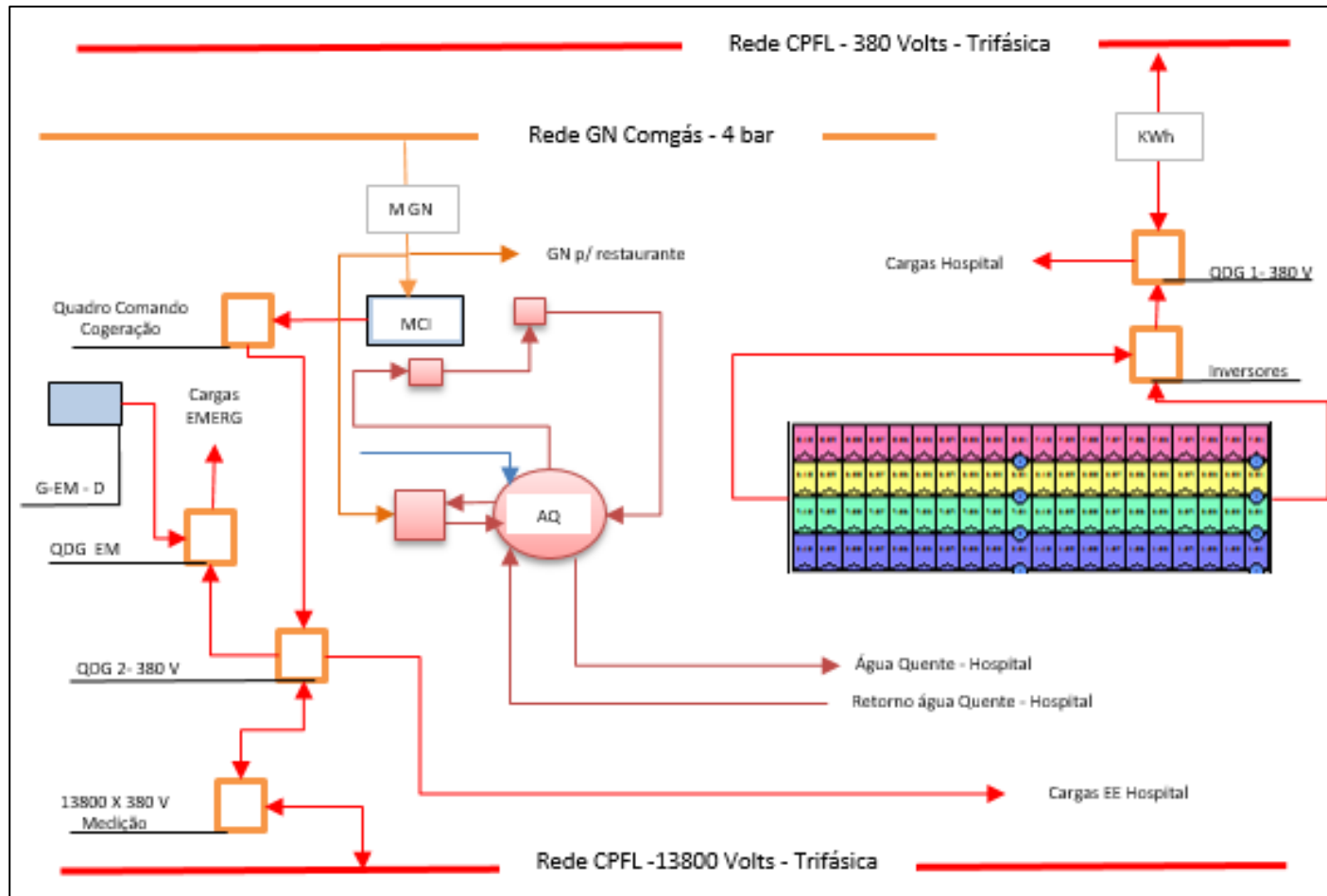


Figura 6.12 – Diagrama de processo da solução integrada – cenário 3

O gerador fotovoltaico está injetando a energia gerada na conexão de baixa tensão, e a cogeração na entrada de média tensão.

- Comparação da situação atual x solução integrada (cenário 3)

<i>(BC) COMPARAÇÃO : [100 % elétrico] X [cogeração a GN (e elétrica + água quente) + geração fotovoltaica (e elétrica)]</i>		
UTILIDADES	Atual	Cogeração + Ger. Fotovoltaica
ENERGIA ELÉTRICA	CPFL A4 AZUL	CPFL A4 VERDE
Demanda Energia Elétrica Ponta (kW)	340	0
Demanda Energia Elétrica F- ponta (kW)	400	240
Consumo Anual Ponta (kWh)	186.389	78.796
Geração anual fotovoltaica (KWh)	-	157.400
Consumo Anual Fora Ponta (kWh)	1.898.631	994.328
Consumo Anual Total (kWh)	2.085.020	1.073.124
Custo Específico (R\$/kWh) - C/ Impostos	RS0,50236	RS0,45140
Custo anual total de energia elétrica	RS1.047.429	RS484.405
GERAÇÃO DE ENERGIA A GÁS NATURAL		Motogerador Caterpillar
Capacidade (kW)	-	143
Produção energia elétrica [KWh/ano]	-	782.496
Consumo Anual de Gás Natural (m3)	-	257.120
Custo do GN (R\$/m3) - C/ Impostos - 31/05/2017	-	R\$1,411346
Custo operação e manutenção planta	-	R\$58.687
Custo anual de geração de energia elétrica	-	RS421.572
Custo do kWh Gerado (R\$/kWh) - C/ Impostos	-	RS0,53875
GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA TÉRMICA - ÁGUA QUENTE		
Energia térmica produzida diariamente	2.400.000	2.439.130
Energia térmica produzida anualmente (Kcal/h)	876.000.000	845.768.251
Consumo anual energia elétrica - (KWh)	72.000	-
Energia térmica produzida anualmente QD (Kcal/h) - BACKUP	0	-
CUSTO OPERACIONAL	Atual	Cogeração + Ger. Fotovoltaica
Custo anual total de energia elétrica	RS1.011.259	RS484.405
Custo anual com os chuveiros elétricos (elétrico)	R\$ 36.170	-
Custo anual manutenção gerador fotovoltaico - oper + manut	-	R\$12.749
Custo cogeração	-	R\$421.572
CUSTO OPERACIONAL TOTAL	RS1.047.429	RS918.726
ECONOMIA OPERACIONAL	REFERÊNCIA	RS128.704
		12,3%
INVESTIMENTOS	Atual	Cogeração + Ger. Fotovoltaica
Aquisição de um gerador 143 Kwe	R\$0	R\$239.096
Instalação de um gerador 143 Kwe	R\$0	R\$214.500
Aquisição de dois trocadores de calor - TC-1 e TC-2	R\$0	R\$57.200
Construção rede interna de gás natural	R\$0	R\$20.000
Rede de aço carbono isolada para água quente isolada	R\$0	R\$50.000
Tanque água quente 5 m³ com bomba e conexões	R\$0	R\$25.000
Instalações elétricas, comissionamento e startup	R\$0	R\$30.000
Gerador fotovoltaico - equipamento e instalação	R\$0	R\$424.960
INVESTIMENTO TOTAL	RS0	RS1.060.756
IVESTIMENTO ADICIONAL		RS1.060.756
PAYBACK SIMPLES (anos)		8,24

Tabela 6.17 – Comparação da solução atual x solução integrada (cenário 3)

- Cálculo da taxa de desconto: pela metodologia WAAC

Calculo Taxa de Desconto - Metodologia WACC		
$WAAC = Ke*(E/(D+E)) + Kd*(D/(D+E))$		
WAAC - weighted Average Cost of Capital		
Ke - custo do capital proprio		
Kd - custo do R\$ emprestado		
E - total do patrimonio para o projeto		R\$ 1.060.756,00
D- total financiado		R\$ 0,00
P - prazo financiamento		
Custo do Capital Proprio		
SELIC - % aa	8,0%	
CDB - % aa	3,5%	
IBOVESPA - % aa	5,0%	
Somatória opções	16,5%	
Média	5,5%	
Inflação	4,5%	
Média + Inflação energia	10,0%	
Ke - Custo capital próprio	10,0%	
WACC = Taxa de Desconto		10,0%
Kd - custo capital terceiro		
Instituição bancária		
WACC - 30%P/70% F		

Tabela 6.18 – Cálculo da taxa de desconto – metodologia WACC

- Planilha financeira para a solução integrada – cenário 3: A tabela traz o fluxo de caixa e os índices e financeiros para 15 anos de operação do sistema Fv (107,5 KWp) e cogeração a gás natural (143 KWe) do cenário 3.

Planilha Financeira Solução Híbrida (Base Case) : 15 anos de Análise								
	Unidades e Fórmulas	2017 Ano de instalação	2018 1º ano oper.	2019 2º ano oper.	2020 3º ano oper.	2030 13º ano oper.	2031 14º ano oper.	2032 15º ano oper.
Economia com EE / Inflação	[R\$]	4,5%	563.024,41	588.360,51	614.836,74	954.822,65	997.789,67	1.042.690,20
Juros ativos anual sobre economia	[%]	3,5%	0,00	4.707,33	9.626,49	72.794,33	80.777,40	89.119,72
Custo operacional da cogeração a GN	[R\$]		421.572,08	440.542,83	460.367,25	714.936,27	747.108,40	780.728,28
Custo operacional da geração FV	[R\$]		12.748,80	13.322,50	13.922,01	21.620,45	22.593,37	23.610,08
Investimento com a cogeração a GN	[R\$]	- 635.796,00						
Investimento gerador FV	[R\$]	- 424.960,00						
Investimento solução híbrida / Fluxo de caixa	[R\$]	- 1.060.756,00	128.703,53	139.202,52	150.173,97	291.060,25	308.865,30	327.471,57
Fluxo de caixa acumulado [R\$]	[R\$]		-932.052,47	-792.849,95	-642.675,98	1.582.943,00	1.891.808,29	2.219.279,86
Taxa de desconto	[%]	10,0%						
Valor presente	[R\$]	$Vp=Vi/(1+r)^t$	117.003,21	115.043,41	112.827,92	84.309,79	81.333,89	78.394,09
Fluxo de caixa descontado	[R\$]	-	-943.752,79	-828.709,39	-715.881,46	260.591,43	341.925,32	420.319,41
Payback descontado	[Anos]	10,02						
Valor Presente Líquido: 15 anos	[R\$]	R\$ 420.319,41	-943.752,79	-828.709,39	-715.881,46			420.319,41
Taxa Interna de Retorno: 15 anos	[%]	15,34%	-87,87%	-57,20%	-34,64%	13,85%	14,67%	15,34%
Custo da EE Produzida pela Cogeração	$Vp=Vi/(1+r)^t$							
Valor presente dos custos operacionais	[R\$]	4.113.844,26	383.247,35	364.084,98	345.880,73	207.091,57	196.736,99	186.900,14
Valor presente do investimento	[R\$]	635.796,00	2.655.877,68					
Valor presente custos operacional + investimento	[R\$]	4.749.640,26						
Energia produzida cogeração em 15 anos [KWh]	[KWh]	11.737.440						
R\$/Kwh cogeração para 15 anos de operação	[R\$/KWh]	0,405						
Custo da EE Produzida pela Geração FV	$Vp=Vi/(1+r)^t$							
Valor presente dos custos operacionais	[R\$]	124.407,14	11.589,82	11.010,33	10.459,81	6.262,68	5.949,54	5.652,06
Valor presente do investimento	[R\$]	424.960,00						
Valor presente custos operacional + investimento	[R\$]	549.367,14						
Energia produzida ger fotov em 15 anos [KWh]	[KWh]	2.361.000						
R\$/Kwh ger fotov para 15 anos de operação	[R\$/KWh]	0,233						
Custo Médio da EE Prod.: Cog. + Ger. FV	$Vp=Vi/(1+r)^t$							
V. P. Custos operacionais: Cog + fotov	[R\$]	4.238.251,40						
V P dos investimentos: Cog + fotov	[R\$]	1.060.756,00						
V P dos inv + custo oper: Cog + fotov	[R\$]	5.299.007,40						
Energia produzida em 15 anos: Cog + fotov	[KWh]	14.098.440						
Custo médio da energia 15 anos: Cog + fotov	[R\$/KWh]	0,376						

Tabela 6.19 – Planilha financeira para a solução integrada (cenário 3)

6.4. Cenário 4: Concepção de cogeração de maior porte limitada ao consumo de energia elétrica, com geração de energia elétrica, água quente e água gelada

A luz das premissas do estudo selecionamos um motor da Caterpillar a gás natural com potência compatível para a geração máxima da energia elétrica média atualmente consumida, utilizando o regime de compensação. A unidade está projetada para prover a totalidade da demanda de água quente e parte da água gelada, tendo como premissa operar 16 horas por dia, ou seja, das 06:00 as 22:00 horas. Considerado disponibilidade da cogeração de 95%.

O gerador selecionado é o Caterpillar G 3406, 227 KWe, rendimento elétrico de 30% operando à gás natural.

- Diagrama de processo da cogeração a gás natural - cenário 4

O diagrama e balanço energético a seguir foi concebido para a geração da totalidade da água quente demandada e parte da água gelada e mais de 90% da energia elétrica consumida,

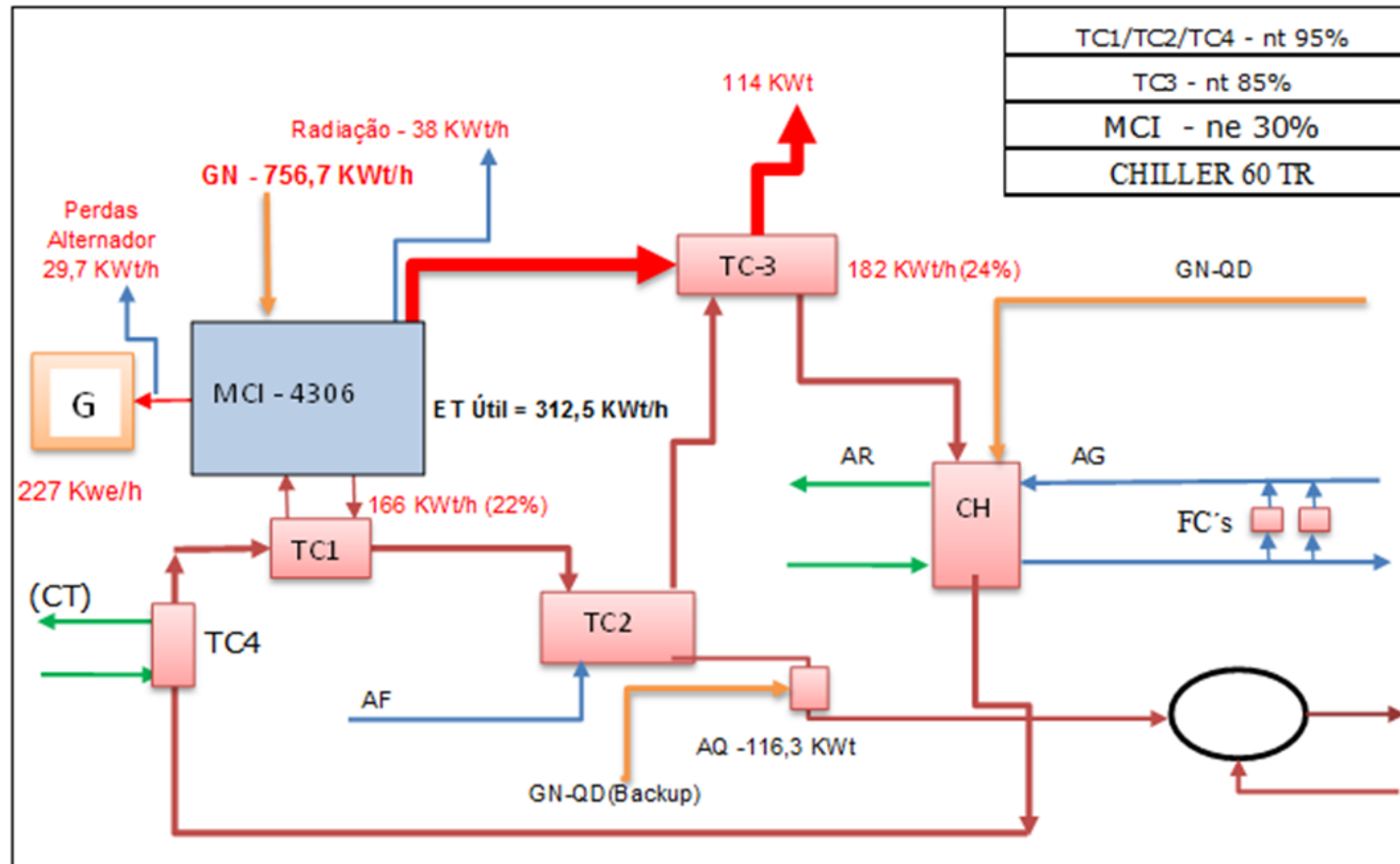


Figura 6.13 – diagrama de processo cogeração 227 KWe – cenário 4

- Balanço energético cogeração cenário 4

Motor de 227 KWe, com rendimento efetivo considerado para os cálculos de 30%, operação de 16 horas e 95% de disponibilidade de forma a compensar a totalidade da energia elétrica / água quente e parte da água gelada demandada para o sistema de ar condicionado.

Balanço Energético	G 4306 Caterpillar			
Consumo Gerador:	0,3349	m ³ /kWh	-	-
Capacidade:	227	kWe	-	-
Vazão horária GN:	76	m ³ /h	-	-
PCI GN	8.560	kcal/m ³	9,9535	KWt/m ³
Energia Entra Gerador	650.733	kcal/h	756,7	KWt/h
Energia Térmica Bloco	22%	%	-	-
Eficiência do Trocador	95%	%	-	-
Energia Térmica Bloco Útil	136.003	kcal/h	158,1	KWt/h
Energia Térmica Exaustão	24%	%	-	-
Eficiência do Trocador	85%	%	-	-
Energia Térmica Exaustão Útil	132.750	kcal/h	154,4	KWt/h
Energia Térmica Útil Total - 16 horas de operação da cogeração	268.753	kcal/h	312,5	KWt/h
	4.300.046	kcal/dia	5.000,1	KWt/h
Demanda de Energia Térmica AQ (reservatório cobre cogeração fora de operação)	2.400.000	Kcal/h dia	2.790,7	KWt/dia
	876.000.000	kcal/ano	1.018.604,7	KWt/h
	100.000	kcal/h	116,3	KWt/ano
Energia térmica excedente	1.900.046	Kcal/h dia	2.209,4	KWt/dia
Eficiência do Chiller - 60 TR	100%		60	TR
Energia térmica útil - frio (16 horas)	1.900.046	kcal/h dia	2.209,4	KWt/dia
	658.840.904	Kcal/h ano		
	118.753	kcal/h	138,1	
Demanda média frio	118.945	Kcal/h	138,3	KWt/h
	2.854.669	Kcal/h dia	3.319	KWt/dia
Volume de gás natural QD - 8 horas dia	-954.623	Kcal/h dia	-1.110	
	-119.328	Kcal/h	-138,8	KWt/h
	14	M ³ /h		
	100%	Eficiência		
	14	M ³ /h	138,8	KWt/h
	112	M ³ /dia	1.110	KWt/dia
	40.705	M ³ /ano	405.160	KWt/ano

Tabela 6.20 – Balanço energético da cogeração 227 KWe – cenário 4

6.5. Avaliação dos índices de viabilidade dos cenários estudados

Buscando desafiar as tecnologias, estudamos a viabilidade e custo da energia elétrica produzido durante a vida útil para cada uma das instalações correspondentes aos cenários estudados. Chamamos a solução integrada como *base case*, e as demais alternativas como sensibilidades para melhor avaliação, como segue:

- Cenário 1 – Geração FV 105,7 KWp;
- Cenário 2 – Cogeração de 143 KWe + 187 KWt;
- Cenário 3 (base case) – Solução integrada: cenário 1 + cenário 2
- Cenário 4 – Cogeração de 227 KWe + 312 KWt;

Para simplificar o entendimento devemos ter ciência que a solução base case proporciona compensação parcial da energia elétrica e a totalidade da demanda térmica. Esta solução apresenta aproveitamento total da energia térmica, melhores índices de viabilidade e menor custo de produção da energia elétrica para os 15 anos analisado.

- Comparação entre os 4 cenários estudados: a tabela 6.21 apresenta as premissas, dados físicos e financeiros para cada um dos cenários identificados no capítulo de análise da questão e avaliados ao longo da monografia.

Comparação entre Cenários Estudados					
Descrição	Unidade	Cenário 1 - Gerador FV 107,5	Cenário 2 - Cogeração 143 Kwe	Cenário 3 - cenário 1 + cenário 2	Cenário 4 - Cogeração 227 Kwe
Potência cogeração a gás natural : 16 horas op	[Kwe]		143 Kwe	143 Kwe	227 Kwe
Potência da geração fotovoltaica	[KWp]	107,5 KWp		107,5 KWp	
Investimento - equipamentos e instalações	[R\$]	424.960,00	635.796,00	R\$ 1.060.756,00	R\$ 2.445.844,00
Consumo anual de energia elétrica	[KWh]	2.085.020			
Geração anual de energia elétrica	[KWh/ano]	157.400	782.496	625.096	1.285.920
FUE - Fator Utilização do Combustível	[%]		71%	71%	71%
Geração anual de energia térmica - total	[KWt/ano]	0	1.035.212,06	1.035.212,06	1.825.019
Demanda anual de energia térmica - AQ	[KWt/ano]	1.018.605	1.018.604,65	1.018.604,65	1.018.605
Demanda anual de energia térmica - AG	[KWt/ano]	1.211.575	1.211.574,55	1.211.574,55	1.211.575
Excedente ou Falta anual de energia térmica	[KWt/ano]	-2.230.179	-1.194.967	-1.194.967	- 405.160
Eergia térmica gerada por queima direta	[KWt/ano]		0,00	0,00	405.160
Custo operacional	[R\$]	12.748,80	971.357,68	R\$ 434.320,88	R\$ 815.928,29
Economia operacional	[R\$]	66.322,55	76.071,52	R\$ 128.703,53	R\$ 231.500,91
Tarifa média EE c/ impostos atual: A4 azul CPF	[R\$/KWh]	R\$ 0,50	R\$ 0,50	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Taxa desconto ao ano	[%]	10%	10%	10,0%	10,0%
Taxa de inflação ao ano	[%]	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%
Juros ativos ao ano	[%]	3,50%	3,50%	3,50%	3,50%
Período para recuperação investimento - PBS	[anos]	6,41	8,36	8,24	10,57
Período para recuperação investimento - PBD	[anos]	7,55	10,18	9,62	10,07
Taxa interna de retorno - TIR	[%]	20,06%	15,10%	15,34%	15,12%
Calculo do custo da energia elétrica produzida no período de 15 anos por solução					
Custo da EE > Cogeração a gás natural	[R\$/KWh]		R\$ 0,40	R\$ 0,40	R\$ 0,48
Custo da EE > Geração fotovoltaica	[R\$/KWh]	R\$ 0,23		R\$ 0,23	
Custo médio da EE > Cogeração + Fotovoltaica	[R\$/KWh]			R\$ 0,38	

Tabela 6.21 – Comparação entre os cenários estudados

- Gráficos financeiros: comparação entre os cenários estudados

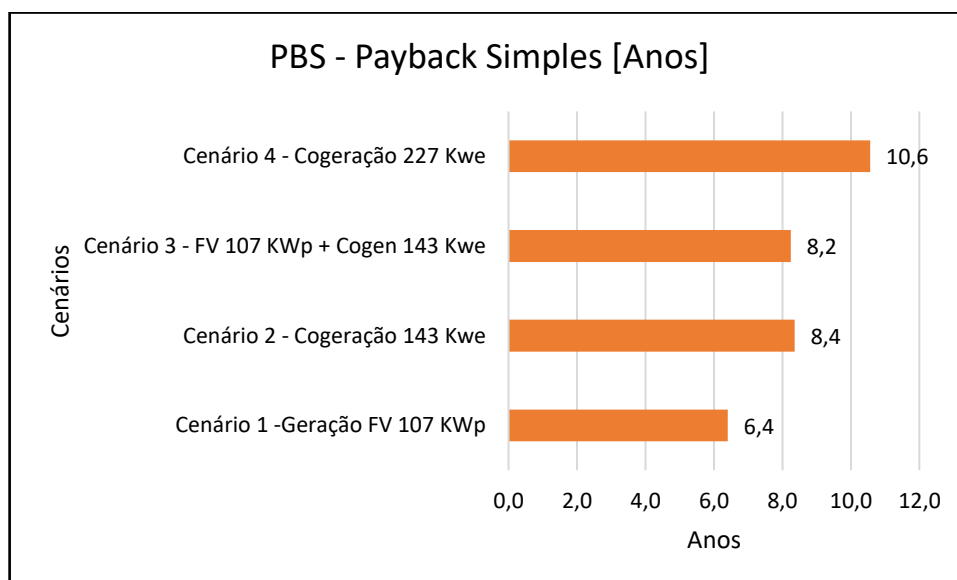


Figura 6.14 – Comparação Payback Simples entre cenários estudados

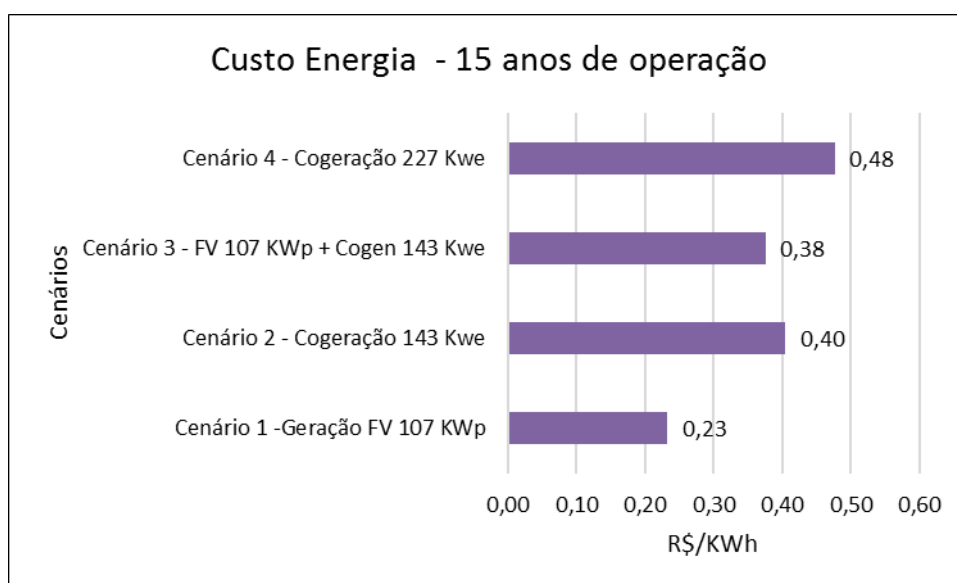


Figura 6.15 – Comparação do custo da energia dos cenários estudados

A luz da tabela e dos gráficos fica comprovado que a melhor solução é o cenário 3. A opção do gerador fotovoltaico não foi considerada como opção isolada por estar limitada a área de exposição existente no hospital, fato que leva a geração de energia elétrica abaixo de 10% do consumo atual. Este nível de compensação da energia elétrica consumida inviabiliza a geração fotovoltaica como alternativa isolada.

- Abertura do investimento: tecnologias e adequações.

A tabela e gráfico deste tópico apresenta a relação entre os custos para implantação da tecnologia de cogeração com os valores envolvidos para as adequações das instalações e dos prédios para utilizar a energia térmica rejeitada em forma de calor e frio no hospital. Verifica-se que os valores das adequações são significativamente impactantes no cenário 4, devido às mudanças e adequações necessárias principalmente no HVAC do hospital.

Investimento	Cenário 1 [R\$]	Cenário 2 [R\$]	Cenário 3 {R\$}	Cenário 4 [R\$]
Total	424.960,00	635.796,00	1.060.756,00	2.445.844,00
Fotov. / Cogen	424.960,00	530.796,00	R\$ 955.756,00	1.055.844,00
Adequações	R\$ 0,00	105.000,00	R\$ 105.000,00	1.390.000,00

Tabela 6.22 – Custo das tecnologias e adequações por cenário

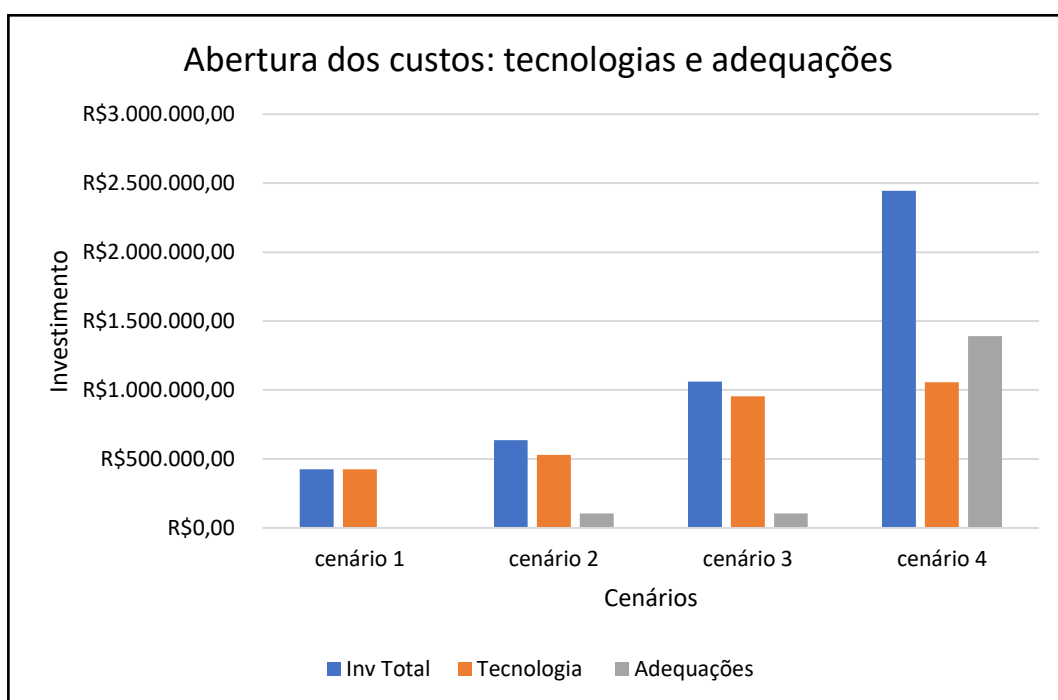


Figura 6.16 – Custo da tecnologia e adequações por cenário

6.6. Upsides para viabilização da melhor solução - cenário 3

Os upsides são oportunidades com alguma probabilidade de ocorrer ao longo da vida do sistema. Estas alternativas foram simuladas apenas para o melhor cenário estudado, ou seja, o cenário 3. Como visto, os índices de viabilidade para o cenário 3 são os melhores, porém não atrativos o suficiente para implantação do projeto.

Na busca de alternativas para implantar o sistema, simulamos na planilha financeira dois (02) *upsides* com alguma probabilidade real de ocorrência. Esta simulação só foi efetuada para o cenário 3 como segue:

- Majoração em 10% a tarifa de energia elétrica. Essa alteração poderá ocorrer em caso de despachos de usinas térmicas a gás ou outra fonte primária. Esta ocorrência seria materializada com a redução dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas, e consequente incremento na conta de energia elétrica por meio das bandeiras tarifárias regulamentadas. Para o cálculo de viabilidade apresentado, utilizamos a bandeira tarifária verde.
- Redução em 10% a tarifa do gás natural. Essa nova condição poderá ocorrer a título de incentivo por parte da concessionária ou até mesmo a redução do ICM pelo regulador em face ao apelo social que o empreendimento apresenta.

A tabela a seguir demonstra o impacto das alterações das tarifas no cenário 3. É possível constatar sensível melhora na viabilidade do projeto integrado do cenário 3, composto por cogeração de 143 KWe e gerador fotovoltaico de 107,5 KWp.

- Tabela dos Upsides Simulados – Cenário 3

O quadro abaixo é demonstra a influência das tarifas (energia elétrica e gás natural) nos índices de viabilidade e custo da energia produzida em sistema integrando cogeração e geração fotovoltaica. Esta simulação foi desenvolvida para o sistema concebido para o cenário 3.

Aplicação dos Upsides para Viabilização da Solução Integrada - Cenário 3		
Tarifas Reais e Premissas		
Tarifa energia elétrica atual com impostos	[R\$/KWh]	0,50236
Tarifa do gás natural com tributos	[R\$/M³]	1,41135
Investimento inicial	[R\$]	R\$ 1.060.756,00
Inflação (ao ano)	[%]	4,50%
Juros ativos (ao ano)	[%]	3,50%
Taxa de desconto aplicada (ao ano)	[%]	10,00%
Índices de Viabilidade - sem upsides		
PBS - payback simples	[anos]	8,24
PBD - payback descontado	[anos]	10,02
VPL - valor presente líquido	[R\$]	R\$ 420.319,41
TIR - taxa interna de retorno	[%]	15,34%
Custo da energia produzida em 15 anos	[R\$/KWh]	R\$ 0,38
Novas tarifas: energia elétrica e gás natural		
Nova tarifa média e elet. c/ tributos (> 10%)	[R\$/KWh]	0,55260
Nova tarifa média GN c/ tributos (< 10%)	[R\$/M³]	1,27021
Índices de Viabilidade - com upsides		
PBS - payback simples	[anos]	3,93
PBD - payback descontado	[anos]	4,47
VPL - valor presente líquido	[R\$]	R\$ 2.043.259,15
TIR - taxa interna de retorno	[%]	31,71%
Custo da energia produzida em 15 anos	[R\$/KWh]	R\$ 0,35

Tabela 6.23 – Upsides para viabilização da solução integrada (cenário 3)

7. Balanço ambiental para a solução integrada (cenário 3)

Um trecho do capítulo 17, do manual de Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética, concebido pelas professoras Hirdan Costa, Marilyn M. dos Santos e Patrícia Matai, retrata muito bem o contexto da questão ambiental no segmento energético, como transcrito no livro de energia renovável, geração distribuída e eficiência energética, Simões- Moreira J.R. 2017.

“ A apropriação da natureza e das diversas fontes de energia primária pelo homem, com a consequente conversão em energia secundária e disponibilização para os diferentes usos finais, acarretou problemas ambientais que a sociedade atual passou a ter a missão de contornar, mitigar e extinguir. ”

Nessa linha de raciocínio, partimos para avaliar o incremento da matriz energética brasileira suprido pelas termelétricas a gás natural e outros fósseis mais impactantes. Como relatado pela EPE em 2013, nosso país continua sendo o que tem maior participação de energias renováveis na composição, predominando a hidráulica, biomassa, eólicas e agora também a fotovoltaica.

É importante sempre ter em mente que qualquer que seja a fonte primária algum tipo impacto ambiental negativo ou positivo existirá, quer na fabricação, implantação ou operação. Como exemplo podemos citar as áreas alagadas das usinas hidrelétricas, que produz grande quantidade de metano que por sua vez favorece o efeito estufa.

O balanço ambiental é resultado dos impactos causados pelo sistema integrado (cenário 3 - composto por gerador fotovoltaico e cogeração à gás natural), versus continuar adquirindo a energia da rede de distribuição, a qual está conectada ao sistema integrado nacional.

7.1. Impacto ambiental com a geração fotovoltaica anual de 157.400 KWh

Esta estimativa simula os ganhos ambientais com a implantação do gerador fotovoltaico de 107,5 KWp, considerando a redução de utilização da energia elétrica da rede, fato que exigirá menor utilização das usinas térmicas, as quais tem o papel de suprir a demanda acima da capacidade das usinas renováveis do sistema integrado nacional (SIN).

Utilizado como premissa para os cálculos a geração de energia elétrica ocorrido em 2014 conforme “Anuário Estatístico da EPE 2015”, ano base 2014, tabela 2.3”. A produção brasileira total para 2014 foi de 590.479×10^3 MWh. Deste total produzido em 2014, 131.128×10^3 MWh foi proveniente de usinas térmicas à combustíveis fósseis na seguinte proporção:

- Usinas térmicas à derivados de petróleo – 31.668 MWh - 24%;
- Usinas térmicas à carvão mineral - 18.385 MWh - 14%;
- Usinas térmicas à gás natural – 81.075 MWh - 62%.

- **Cálculo da redução na emissão de CO₂**

Os cálculos a seguir foram baseados na proporção da geração de energia elétrica gerada por tipo de fonte fóssil conforme “Anuário Estatístico da EPE 2015”, ano base 2014, tabela 2.3” e a emissão de dióxido de carbono por tipo de fonte fóssil também com base no “Anuário Estatístico da EPE 2015, base 2014, tabela 2.5”.

- Emissão de CO₂ nas térmicas à comb. fóssil: 71×10^6 tons de CO₂;
- Emissão de CO₂/MWh com a geração total (renováveis + fósseis) = 71×10^6 tons CO₂ / 590.479×10^3 MWh = 0,1202 tons CO₂/MWh;
- Emissão de CO₂/MWh apenas para a geração de EE em térmicas à combustíveis fósseis = 71×10^6 tons CO₂ / 131.128×10^3 MWh = 0,5415 tons CO₂/MWh
- Redução da emissão de CO₂ = $157,4 \times 0,54 = \mathbf{85,0 \text{ tons de CO}_2/\text{ano.}}$

- **Cálculo da redução de emissão de SO₂.**

A geração fotovoltaica local reduz a utilização de energia da rede produzida por térmicas. Para os cálculos utilizamos a proporção para cada tipo de combustível fóssil queimado o Anuário EPE 2015 e para as emissões por tipo de combustível fóssil o relatório *“Energy and Air Pollution – WEO – Special Report – 2016 - Global Average Emissions Factors and Share of Major Pollutant Emissions by Fuel, 2015”*

- Térmicas à carvão mineral (coal): 10 Kt / Mtoe
Como: 1 MWh = 0,086 toe (conforme estatística IEA)
Logo: 1 Mtoe = $10^6 \text{ toe} \times 1 \text{ MWh} / 0,086 \text{ toe} = 11,63 \times 10^6 \text{ MWh}$
 $= 10 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,86 \text{ KG SO}_2/\text{MWh}$
- Térmicas à derivados de petróleo (oil): 6 Kt/Mtoe
 $= 6 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,52 \text{ Kg SO}_2/\text{MWh}$
- Térmicas à gás natural (NG): 0 Kt/Mtoe = 0,00 Kg SO₂/MWh
- Cálculo Kg SO₂/MWh na geração térmica brasileira = $(14\% \times 0,86) + (24\% \times 0,52) + (62\% \times 0,00) = 0,25 \text{ Kg SO}_2/\text{MWh}$
- Redução da emissão de SO₂ com a geração FV = $157,4 \text{ MWh} \times 0,25$
= 39,4 Kg de SO₂ por ano

- **Cálculo da redução da emissão de NO_x**

Com o gerador FV em comparação com as térmicas brasileiras, proporcional para cada combustível (EPE 2014) e com base nas emissões do relatório *“Energy and Air Pollution – WEO – Special Report – 2016 - Global Average Emissions Factors and Share of Major Pollutant Emissions by Fuel, 2015”*

- Térmicas à carvão mineral (coal): 5Kt/Mtoe
 $= 5 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,43 \text{ Kg NO}_x/\text{MWh}$
- Térmicas à derivados de petróleo (oil): 17 Kt/Mtoe;
 $= 17 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 1,46 \text{ kg NO}_x/\text{MWh}$
- Térmicas à gás natural (NG): 3 Kt/Mtoe
 $= 3 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,26 \text{ Kg NO}_x/\text{MWh}$

- Cálculo Kg NOx/MWh para a geração térmica brasileira = $(14\% \times 0,43) + (24\% \times 1,46) + (62\% \times 0,26) = 0,57 \text{ Kg NOx/MWh}$
- Redução da emissão de NOx com a geração FV = $157,4 \text{ MWh} \times 0,57 = 89,7 \text{ Kg de NOx}$.

Consideramos como premissa que a produção de energia elétrica nas termelétricas brasileiras, terão sua produção reduzidas na proporção da produção local, como é o caso do projeto estudado para o hospital. Os valores são anuais.

- **Tabela dos ganhos ambientais com a geração fotovoltaica**

Ganhos ambientais com a redução do consumo da rede	
Dióxido de carbono (CO ₂)	85,0 tons/ano
Dióxido de enxofre (SO ₂)	39,4 kg/ano
Óxido de Nitrogênio (NO _x)	89,7 kg/ano

Tabela 7.1 – Impacto ambiental gerador fotovoltaico

As reduções nas emissões foram obtidas tendo como premissa que a geração distribuída reduzirá a geração de energia elétrica nas térmicas utilizando combustíveis fósseis na proporção da geração local.

7.2. Impacto ambiental com a redução do consumo da rede de 854.496 KWh / ano com a implantação da cogeração à gás natural de 143 KWe.

Redução de aquisição de energia elétrica da rede = energia elétrica produzida na cogeração + a produção da água quente por meio da recuperação de calor da cogeração = $782.496 \text{ KWh} + 72.000 \text{ KWh} = 854.496 \text{ KWh / ano}$.

Assim como no item 7.1 (impacto ambiental com o gerador fotovoltaico), a premissa para os cálculos foi a geração de energia elétrica de 2014 conforme “Anuário Estatístico da EPE 2015”, ano base 2014, tabela 2.3”. A produção brasileira total para 2014 foi de $590.479 \times 10^3 \text{ MWh}$. Deste total produzido em 2014, $131.128 \times 10^3 \text{ MWh}$ foi proveniente de usinas térmicas à combustíveis fósseis na seguinte proporção:

- Usinas térmicas à derivados de petróleo – 31.668 MWh - 24%;
- Usinas térmicas à carvão mineral - 18.385 MWh - 14%;
- Usinas térmicas à gás natural – 81.075 MWh - 62%.

- **Cálculo da redução na emissão de CO₂**

Os cálculos a seguir foram baseados na proporção da geração de energia elétrica gerada por tipo de fonte fóssil conforme “Anuário Estatístico da EPE 2015”, ano base 2014, tabela 2.3” e a emissão de dióxido de carbono por tipo de fonte fóssil também com base no “Anuário Estatístico da EPE 2015, base 2014, tabela 2.5”.

- Emissão de CO₂ nas térmicas à comb. fóssil: 71×10^6 tons de CO₂;
- Emissão de CO₂/MWh para a geração brasileira total (renováveis + fósseis) = 71×10^6 tons CO₂ / 590.479×10^3 MWh = 0,1202 tons CO₂/MWh;
- Emissão de CO₂/MWh apenas para a geração de energia elétrica em térmicas à combustíveis fósseis = 71×10^6 tons CO₂ / 131.128×10^3 MWh = 0,5415 tons CO₂/MWh
- Redução da emissão de CO₂ = $854,5 \times 0,54 = \mathbf{461,4 \text{ tons CO}_2}$

- **Cálculo da redução na emissão de SO₂**

A cogeração local reduz a utilização de energia da rede produzida por térmicas. Para os cálculos utilizamos a proporção para cada tipo de combustível fóssil queimado o Anuário EPE 2015 e para as emissões por tipo de combustível fóssil o relatório “*Energy and Air Pollution – WEO – Special Report – 2016 - Global Average Emissions Factors and Share of Major Pollutant Emissions by Fuel, 2015*”

- Térmicas à carvão mineral (coal): 10 Kt / Mtoe
Como: 1 MWh = 0,086 toe (conforme estatística IEA)

$$\begin{aligned}\text{Logo: } 1 \text{ Mtoe} &= 10^6 \text{ toe} \times 1 \text{ MWh}/0,086\text{toe} = 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} \\ &= 10 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,86 \text{ KG SO}_2/\text{MWh}\end{aligned}$$

- Térmicas à derivados de petróleo (oil): 6 Kt/Mtoe
 $= 6 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,52 \text{ Kg SO}_2/\text{MWh}$
- Térmicas à gás natural (NG): 0 Kt/Mtoe = 0,00 Kg SO₂ / MWh
- Calculo Kg SO₂ / MWh na geração térmica brasileira = (14% x 0,86) + (24% x 0,52) + (62% x 0,00) = 0,25 Kg SO₂ / MWh
- Redução da emissão de SO₂ com a cogeração = 854,5 MWh x 0,25
= 213,6 Kg de SO₂/ano

- **Cálculo da redução da emissão de NO_x**

A cogeração local reduz a utilização de energia da rede produzida por térmicas. Para os cálculos utilizamos a proporção para cada tipo de combustível fóssil queimado o Anuário EPE 2015 e para as emissões por tipo de combustível fóssil o relatório “*Energy and Air Pollution – WEO – Special Report – 2016 - Global Average Emissions Factors and Share of Major Pollutant Emissions by Fuel, 2015* “

- Térmicas à carvão mineral (coal): 5Kt / Mtoe
 $= 5 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,43 \text{ Kg NO}_x/\text{MWh}$
- Térmicas à derivados de petróleo (oil): 17 Kt / Mtoe;
 $= 17 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 1,46 \text{ kg NO}_x/\text{MWh}$
- Térmicas à gás natural (NG): 3 Kt/Mtoe
 $= 3 \times 10^6 \text{ kg} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,26 \text{ Kg NO}_x/\text{MWh}$
- Calculo Kg NO_x / MWh para a geração térmica brasileira = (14% x 0,43) + (24% x 1,46) + (62% x 0,26) = **0,57 Kg NO_x/MWh**
- Redução da emissão de NO_x com a cogeração = 854,5 MWh x 0,57
= 487,1 Kg de NO_x/ano.

Consideramos como premissa que a produção de energia elétrica nas termelétricas brasileiras, terão sua produção reduzidas na proporção da

produção local, como é o caso do projeto estudado para o hospital. Os valores da tabela são anuais

- **Tabela dos ganhos ambientais com a cogeração**

Ganhos ambientais c/ redução consumo da rede	
Dióxido de carbono (CO ₂)	461,4 tons/ano
Dióxido de enxofre (SO ₂)	213,6 kg/ano
Óxido de Nitrogênio (NO _x)	487,1 kg/ano

Tabela 7.2 – Impacto ambiental redução consumo da rede (Cogen)

A tabela demonstra os ganhos ambientais com a redução de 782.496 Kwh/ano devido a geração elétrica do sistema integrado (cenário 3), acrescido de 72.000 KWh/ano com a eliminação dos chuveiros e aquecedores elétricos no ponto de uso por meio da recuperação do calor rejeitado na cogeração. Foi considerado como comparativo a produção desse montante de energia elétrica através de usinas termelétricas utilizando fontes fósseis com o perfil apresentado pelos dados da EPE para 2014 (14%: térmicas à carvão mineral / 24 % térmicas à derivados de petróleo e 62% produzido em térmicas à gás natural).

7.3. Impacto ambiental com a queima anual de 257.120 Nm³ de GN, MCI de 143 KWe da cogeração, 16 horas de operação e 95% de disponibilidade.

- **Emissão** anual de **CO₂** com a cogeração a gás natural.

De acordo com a EIA (*US Energy Information Administration*), relatório de 2 de fevereiro de 2016:

https://www.eia.gov/environment/emissions/co2_vol_mass.php,

- Dióxido de carbono (CO₂): 53,07 [Kg] CO₂ / [MMBTU]
- Volume GN queimado ao ano = 257.120 [Nm³/ano];
- PCI GN = 8560 [Kcal/h]
- 257.120 [Nm³] = 8734 [MMBTU]

- $53,07 \text{ [KgCO}_2\text{/MMBTU} \times 8733,8 \text{ [MMBTU/ano]} = \mathbf{463,5 \text{ tons CO}_2\text{/ano}}$;
- A produção de EE da cogeração, acrescida do calor recuperado para geração de AQ, a energia para o cálculo será = 854,5 MWh/ano
 $= 463,5 \text{ tons CO}_2\text{/ano} / 854,5 \text{ MWh/ano} = 0,54 \text{ tons CO}_2\text{/MWh}$

- **Emissões de NO_x** (óxido de nitrogênio) e **SO₂** (dióxido de enxofre) por ano com a cogeração a gás natural projetada para o hospital.

Para o cálculo da emissão da cogeração local, utilizamos como referência o relatório “*Energy and Air Pollution – WEO – Special Report – 2016 - Global Average Emissions Factors and Share of Major Pollutant Emissions by Fuel, 2015*”

Para produção da cogeração de 782.496 KWh/ ano, acrescido da economia com a geração de água quente de 72.000 KWh/ano, chegamos ao valor de 854.496 KWh/ano (854,5 MWh/ano).

Como 1 MWh equivale a 0,086 toe (conforme estatística IEA)

$1 \text{ Mtoe} = 11,63 \times 10^6 \text{ MWh}$

Emissão de SO₂ para o GN = 0 Kt / Mtoe

Para o GN, conforme WEO 2016, a emissão é zero (**0,00 Kg SO₂/MWh**)

Emissão de NO_x para o GN = 3 Kt / Mtoe

$= 3 \times 10^6 \text{ [kg NO}_x\text{]} / 11,63 \times 10^6 \text{ MWh} = 0,26 \text{ Kg NO}_x\text{/MWh}$

Para a cogeração local a gás natural a emissão anual de SO₂ será de =
 $854,5 \text{ MWh/ano} \times 0,26 \text{ Kg NO}_x\text{/MWh} = \mathbf{222,2 \text{ Kg NO}_x\text{/ano}}$

Emissões geradas com a cogeração: anual	
Dióxido de carbono (CO ₂)	463,5 tons/ano
Dióxido de enxofre (SO ₂)	0,0 kg/ano
Óxido de Nitrogênio (NO _x)	222,2 kg/ano

Tabela 7.3 – Impacto ambiental com a cogen local

7.4. Balanço ambiental para a solução integrada (cenário 3) versus rede

Emissões	Unidades	Redução aquisição EE rede (GFV)	Redução aquisição EE rede (COGEN 143 KWe)	Queima GN na Cogeração local de 143 KWe	Balanço Ambiental Cenário 3
CO2	tons/ano	-85,0	-461,4	+ 463,5	- 82,9
SO2	Kg/ano	-39,4	-213,6	+ 0,00	- 253,0
NOx	Kg/ano	-89,7	-487,1	+ 222,2	- 354,6

Tabela 7.4 – Balanço ambiental solução integrada (cenário 3)

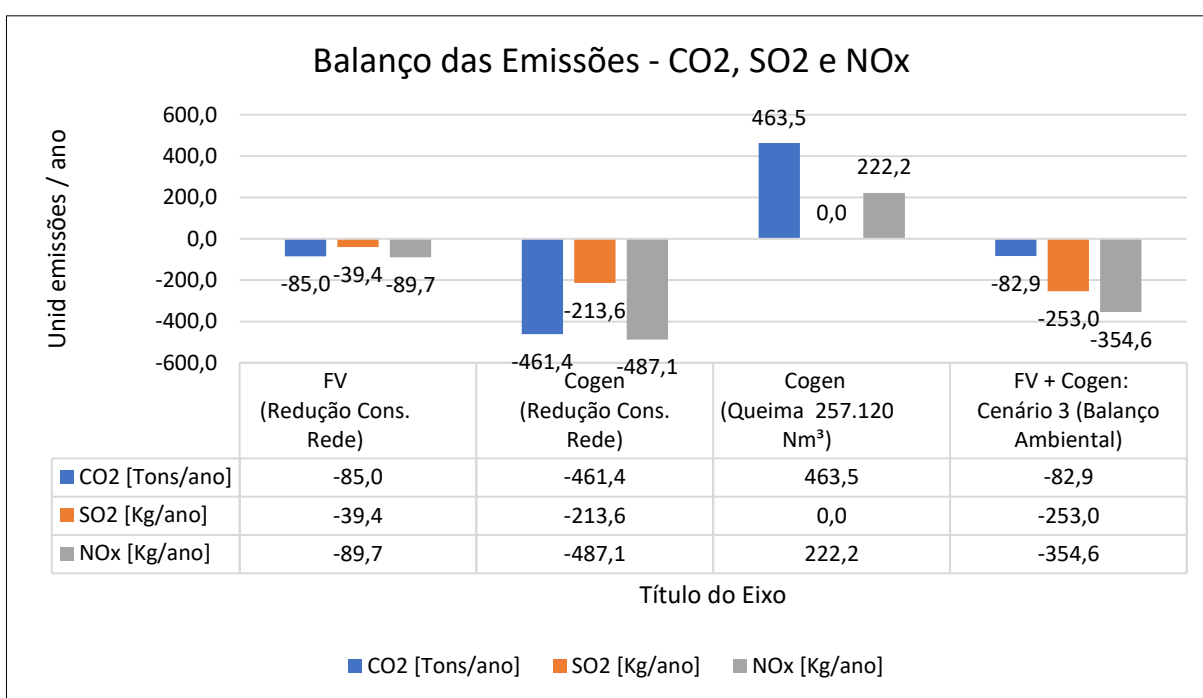


Figura 7.1 - Balanço ambiental solução integrada (cenário 3)

O balanço compara a utilização da energia atualmente consumida da rede da CPFL com a geração própria através de gerador fotovoltaico e cogeração a gás natural, ou seja, o cenário 3 sugerido para estudo.

Foi uma premissa do estudo de caso que toda a energia produzida localmente através da geração distribuída reduzirá a necessidade de entrada em operação das usinas termelétricas do sistema integrado nacional, as quais operam com combustíveis fósseis.

Esta análise foi baseada na distribuição da geração das térmicas por tipo de fontes fósseis conforme “Anuário EPE 2015, ano base 2014”. Neste Anuário a energia produzida pelas térmicas teve a seguinte distribuição:

- 14% da produção das térmicas utilizou carvão mineral;
- 24% da produção das térmicas utilizou derivados de petróleo;
- 62% da produção das térmicas utilizou gás natural.

Esta tabela comparativa (tabela 7.4) e gráfico (figura 7.1), evidencia que a produção de energia local através do sistema integrado proposto, acarretará em ganhos ambientais na proporção da geração local.

8. Conclusões

No estudo de caso deste hospital de pequeno porte, foi evidenciado que a viabilidade do empreendimento de cogeração está fortemente condicionada a recuperação da energia térmica e as tarifas de energia elétrica e gás natural praticadas.

Através da tabela 6.21 (comparação entre cenários), onde é possível afirmar que a solução integrada apresenta os melhores índices de viabilidade em comparação com a cogeração convencional. Os índices obtidos no cenário integrado (cenário 3), ainda que melhor na análise comparativa entre as soluções, não são atrativos o suficiente para prosseguir com o empreendimento.

A partir desta constatação, buscamos alternativas para alavancar a viabilidade do empreendimento, por meio da identificação e simulação de alguns *upsides* que possam afetar positivamente o projeto. Como upsides, foi estimado a elevação da tarifa de energia elétrica e redução da tarifa de gás natural em 10%, como apresentado na tabela 6.23(aplicação dos upsides).

Nesse exercício de simulação dos upsides, foi possível com provar a influência das tarifas na viabilidade do empreendimento de cogeração e geração fotovoltaica, as quais, estão ilustradas nos gráficos para as hipóteses, sem e com *upsides*.

Dentre as alterações estimadas, a elevação da tarifa de energia elétrica em 10% tem probabilidade de ocorrência, visto que foi utilizado para os cálculos a bandeira verde, a qual tem grande probabilidade de migrar para a amarela ou até a vermelha, dependendo dos níveis dos reservatórios de água das usinas hidrelétricas. Quanto ao upside que conta com a redução de 10% na tarifa do gás natural, é pouco provável que ocorra, a menos que exista algum tipo de incentivo com apelo social por parte da concessionária local ou do órgão regulador no tocante ao ICM envolvido.

Apresentamos a seguir os gráficos comparando os índices para as hipóteses, sem e com upsides.

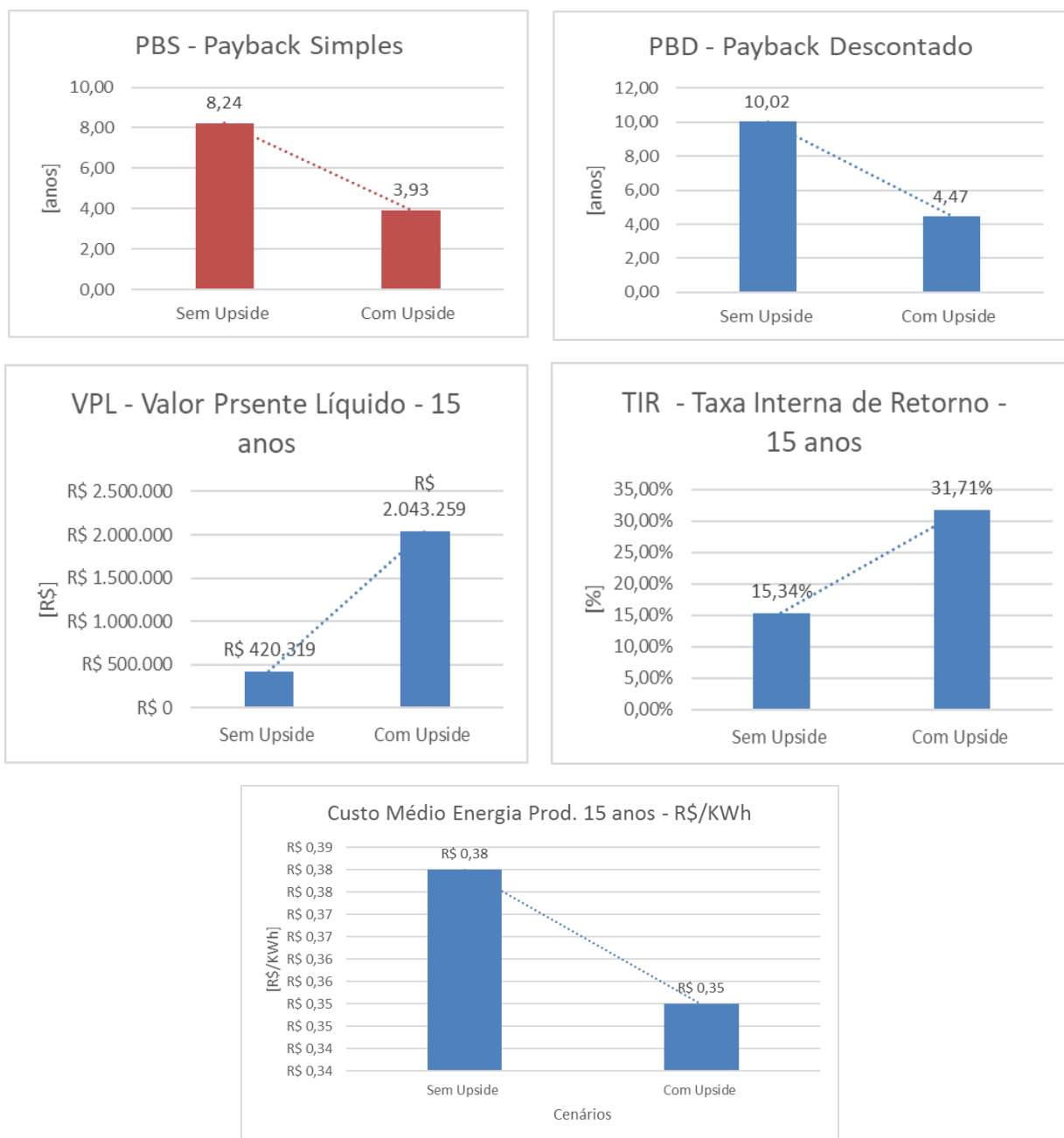


Figura 8.1: Índices de viabilidade sem e com *upside*

O estudo leva em conta que as usinas térmicas operam na margem, ou seja, são despachadas para suprir a diferença entre a geração pelas usinas renováveis e a demanda nacional. Com a produção local, o tempo em operação das térmicas será reduzido na proporção da produção local, fato que justifica o balanço ambiental favorável, mesmo sem considerar as perdas com transmissão e distribuição, o que não ocorre com a geração distribuída.

Esta condição ambientalmente favorável, se alteraria somente na hipótese de alteração da matriz de energia elétrica para 100% proveniente de fontes renováveis. E hoje nada sugere que isto ocorrerá em curto espaço de tempo, portanto, a questão ambiental não será uma barreira para o projeto.

Referências bibliográficas

- Almeida M., Qualificação Sistemas Fotovoltaicos, Mestrado IEE, 2012;
- Aneel, <http://www.aneel.gov.br>;
- ANP, <http://www.anp.gov.br> ;
- Bustos L, Dissertação, Estudo exp. de microplanta cogeração UFSC, 2008;
- Claudio R. F. Pacheco – **Fundamentos da utilização da energia solar** – livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, cap. 9, 2017;
- Caterpillar: <http://www.caterpillar.com.br>;
- Cogeneration Case Studies Handbook, Europe CODE;
- Cogen Europe, <http://www.cogeneurope.eu> ;
- Comgás, www.comgas.com.br;
- CPFL, www.cpfl.com.br ;
- Cummins: Manual de aplicações para Grupos Geradores, rev. janeiro de 2011;
- Cummins: www.cummins.com.br;
- Daniel S Sowmy – Energia solar, tecnologia e aplicações, livro de energia renováveis, geração distribuída e eficiência energética, capítulo 10, 2017;
- Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark (LCA – life cycle assessment – electricity generation);
- Department of Food & Rural Affairs - <http://www.defra.gov.uk/environment>;

- Electric Power Production, ASME Handbook;
- Energy Information Administration: <https://www.eia.gov>;
- Environmental Protection Agency - www.epa.gov;
- EPE_ NOTA TÉCNICA DEA 19/14_ Inserção da Ger. Fotov. no Brasil;
- GasNet: <http://www.gasnet.com.br>;
- Gradella, M., Energia solar fotovoltaica, conceitos e aplicações, Unicamp;
- Marilin. Santos, Questões ambientais e licenciamento ambiental – Capítulo 17 do livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, 2017;
- Mesny M., Motores de Combustão Interna, 1958, Buenos Aires;
- NBR_5410_Inst Elétricas de Baixa Tensão, 2005 / NBR 16149_Sist Fv, 2013;
- Piva L., Mizutani M., Pinto M., Estudo de caso geração de biogás, eletricidade e metano, PECE, ERG-12, 2017 – Coordenação Profa. Suani Coelho;
- Roberto Castro - Legislação e regulação – livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, cap.18, 2017;
- Ronaldo Andreos – Cogeração de Energias Térmica e eletromecânica – livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, cap.12, 2017;
- Simões-Moreira, J.R. 2017. Livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, São Paulo, 2017: LTC
- Simões-Moreira, J.R. – elementos de engenharia termodinâmica – livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, capítulos 1,2 e 3, 2017;

- Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, Roberto Zilles;
- Solar Energy Manual_ Delft University, 2014;
- Suani T. Coelho / Vanessa P. Garcilasso / Javier Escobar / Alessandra Amaral – geração de eletricidade a partir de biomassa, capítulo 11 do livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, 2017;
- Virgínia Parente – Análise de investimentos aplicada a projetos de energia – livro de energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética, cap.16, 2017;
- *World Energy Outlook Report 2016: Energy and Air Pollution*