



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Mecânica

DAVID RODRIGO FRANCO LEON

**Estudo de viabilidade técnica e econômica de
uma planta de produção de hipoclorito de
sódio a partir da água salgada e do
aproveitamento energético local no Chaco
paraguaio**

CAMPINAS
2020

DAVID RODRIGO FRANCO LEON

**Estudo de viabilidade técnica e econômica de
uma planta de produção de hipoclorito de
sódio a partir da água salgada e do
aproveitamento energético local no Chaco
paraguaio**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos exigidos para obtenção
do título de Doutor em Planejamento de Sistemas
Energéticos.

Orientadora: Prof^ª. Dra Carla Kazue Nakao Cavaliero

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
DAVID RODRIGO FRANCO LEON E ORIENTADO
PELA PROFA DRA. CARLA KAZUE NAKAO
CAVALIERO

**CAMPINAS
2020**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F848e Franco Leon, David Rodrigo, 1982-
Estudo de viabilidade técnica e econômica de uma planta de produção de hipoclorito de sódio a partir de água salgada e do aproveitamento energético local no Chaco paraguaio / David Rodrigo Franco Leon. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Carla Kazue Nakao Cavaliero.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Geração distribuída de energia elétrica. 2. Sistemas solar fotovoltaico. 3. Hipoclorito de sódio. 4. Hidrogênio - Armazenamento. 5. Células a combustível. I. Cavaliero, Carla Kazue Nakao, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Technical and economic viability study of a sodium hypochlorite production plant from salt water and the local energy use in the Paraguayan Chaco

Palavras-chave em inglês:

Distributed energy generation

Solar photovoltaic system

Sodium hypochlorite

Hydrogen storage

Fuel cell

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Carla Kazue Nakao Cavaliero [Orientador]

Gustavo Arturo Riveros Godoy

João Carlos Camargo

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

Michel Osvaldo Galeano Espínola

Data de defesa: 06-08-2020

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-6731-6844>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/59604158192936031>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO

**Estudo de viabilidade técnica e econômica de
uma planta de produção de hipoclorito de
sódio a partir da água salgada e do
aproveitamento energético local no Chaco
paraguaio**

Autor: David Rodrigo Franco Leon

Orientador: Carla Kazue Nakao Cavaliero

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof^a. Dra. Carla Kazue Nakao Cavaliero, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas

Dr. João Carlos Camargo
Hytron – Energia e Gases Especiais

Dr. Gustavo Arturo Riveros Godoy
Fundação Parque Tecnológico Itaipú

Prof. Dr. Michel Osvaldo Galeano Espínola
Faculdade de Ciências Químicas – Universidade Nacional de Assunção

Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady
Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 06 de agosto de 2020.

A Deus

A minha esposa,

A meu anjo,

A minha família pelo apoio incondicional

Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar a minha orientadora a Professora Carla Kazue Nakao Cavaliero pela orientação e apoio durante todos estes anos de trabalho de tese.

Aos colegas do PSE, em especial a Pedro Luis, Marina, Juliana, Jorge entre vários outros colegas pela ajuda durante as disciplinas e trabalhos feitos durante o doutorado.

Ao Professor Ennio Peres da Silva pela disposição em orientações e informações que ajudaram na escolha deste tema tese.

À BECAL e FIUNA pela ajuda financeira e a oportunidade de fazer o Doutorado fora do meu país.

Aos membros da Banca de Defesa - Profª. Carla e Profs. Gustavo, Michel, João e Carlos Eduardo - pelas recomendações que ajudaram a melhorar a versão final da tese.

A todos os amigos que fiz nestes anos em Campinas e durante a minha vida. A Jesús e Andys.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a análise de viabilidade técnico-econômica da produção local de hipoclorito de sódio visando substituir totalmente a sua importação pelo Paraguai. Para tanto, propõe-se o aproveitamento da água salgada encontrada na Região Ocidental do Paraguai, conhecido como Chaco, para fornecer ao eletrolisador o insumo principal do processo produtivo. Além disso, visando realizar o aproveitamento energético local, propõe-se analisar dois sistemas de suprimento de energia elétrica, chamados de cenários: (1) um sistema híbrido autônomo de geração solar fotovoltaica e de uso energético do hidrogênio, obtido como subproduto do processo produtivo, em célula a combustível; e (2) a extensão da rede de distribuição de energia elétrica. Os estudos da localização mais adequada para a planta mostraram que a lagoa perto da cidade de Loma Plata tem as condições adequadas para a produção de hipoclorito de sódio. O dimensionamento da planta produtiva para o Cenário 1, que considera a implantação do sistema híbrido isolado da rede elétrica visando atender à demanda do funcionamento diário da planta local, o armazenamento de hidrogênio e a posterior reutilização na planta, por meio de uma célula a combustível, permite aumentar a produção da planta complementada pelo excedente de energia solar fotovoltaica. Já o Cenário 2, dimensionado para a extensão da rede elétrica a uma distância de 14 km, considera que o hidrogênio armazenado seja comercializado, da mesma forma que o hipoclorito de sódio, não havendo aproveitamento energético deste gás na planta. O estudo de viabilidade econômica dos dois cenários indicou que, ao final da vida útil da planta local, o Cenário 1 se mostra menos atrativo que o Cenário 2. No entanto, considerando o aumento da distância da planta produtiva da rede de distribuição, e o excedente energético gerado e armazenado na forma de hidrogênio no Cenário 1, a atratividade do mesmo torna-se superior ao Cenário 2 a partir de 64 km de distância.

Palavras Chave: Geração distribuída de energia elétrica, Sistemas solar fotovoltaico, Hipoclorito de sódio, Hidrogênio – armazenamento, Células a combustível.

Abstract

This work aims to analyze the technical and economic viability of the local production of sodium hypochlorite in order to replace completely its import into Paraguay. To this end, it is proposed to use the salt water found in the Western Region of Paraguay, known as Chaco, to supply the electrolyzer with the main input of the production process. In addition, in order to make the best use of local energy, it is proposed to analyze two electricity supply systems, called scenarios: (1) an autonomous hybrid system of solar photovoltaic generation and hydrogen energy use, obtained as a by-product of the production process in a fuel cell; and (2) the extension of the electricity distribution network. Studies of the most suitable location for the plant have shown that the lagoon near the city of Loma Plata has the right conditions for the production of sodium hypochlorite. The sizing of the production plant for Scenario 1, which considers the implantation of the hybrid system isolated from the electric grid aiming to meet the demand of the daily operation of the local plant, the storage of hydrogen and the subsequent reuse in the plant, through a fuel cell, allows to increase the production of the plant complemented by the surplus of photovoltaic solar energy. Scenario 2, on the other hand, designed for the extension of the electric network at a distance of 14 km, considers that the stored hydrogen is commercialized, in the same way as sodium hypochlorite, with no energy use of this gas in the plant. The economic feasibility study of the two scenarios indicated that, at the end of the useful life of the local plant, Scenario 1 is less attractive than Scenario 2. However, considering the increased distance of the productive plant from the distribution network, and the energy surplus generated and stored in the form of hydrogen in Scenario 1, the attractiveness of it becomes superior to Scenario 2 from 64 km away.

Key Word: Distributed energy generation of electricity, Solar photovoltaic systems, Sodium hypochlorite, Hydrogen – storage, Fuel cells.

Lista de Ilustrações

Figura 2. 1. Importação de NaOCl do Paraguai entre 2006 e 2016.....	26
Figura 2. 2. Mapa do Paraguai e Região Ocidental-Chaco	27
Figura 2. 3. Bacias no Chaco paraguaio	29
Figura 2. 4. Mapa hidrogeológico paraguaio	30
Figura 2. 5. Modelo de perfil das águas subterrâneas no Chaco	32
Figura 2. 6. Diagrama de Piper da água salgada de Loma Plata	35
Figura 2. 7. Duração da eletrólise.....	39
Figura 2. 8. Dependência de consumo de eletricidade para eletrólise.....	40
Figura 2. 9. Custo de 1kg de cloro ativo em diversas concentrações.....	41
Figura 2. 10. Equipamentos para preparação de salmoura.....	43
Figura 2. 11. Diagrama do fluxo de processo, eletrolizador e diluição de H ₂	44
Figura 2. 12. Diagrama do fluxo de armazenamento da NaClO & bombas dosadoras.....	44
Figura 2. 13. Diagrama de operação e funcionamento da planta de NaClO no México	45
Figura 2. 14. Sistema abrandador de água duplo.....	47
Figura 2. 15. Tanque saturador de salmoura	48
Figura 2. 16. Lei de Faraday para eletrólise	50
Figura 2. 17. Esquema de célula eletrolítica.....	52
Figura 2. 18. Eletrolisador com múltiplas pilhas de células eletrolíticas	53
Figura 2. 19. Perspectiva energética do Paraguai 2040.....	60
Figura 2. 20. Eficiências de CaC para diversas potências.....	65
Figura 3. 1. Fluxograma do desenvolvimento metodológico	71
Figura 3. 2. Esquema de funcionamento da planta no Cenário 1	73
Figura 3. 3. Esquema de funcionamento da planta no Cenário 2	74
Figura 3. 4. Perda de NaClO por armazenamento.....	79
Figura 3. 5. Sistema de reservatório, tajar e tanque australiano	82
Figura 4. 1. Curva tendencial de preços NaClO no Paraguai.....	89
Figura 4. 2. Irradiação solar na região do Chaco paraguaio e na Lagoa Curacao	90
Figura 4. 3. Compressor de diafragma Modelo PDC-3-300-600	106
Figura 4. 4. Análise de sensibilidade da venda excedente energia elétrica SFV no Cenário 1	116

Figura 4. 5. Análise de sensibilidade da venda de H ₂ com a energia excendente do SFV no Cenário 1	117
Figura 4. 6. Curva de custo x distância da rede elétrica	118

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1. Classificação da qualidade da água subterrânea	33
Tabela 2. 2. Parâmetros físico-químicos analisados e métodos.....	34
Tabela 2. 3. Quantidade de cloro e soda cáustica para produzir 3.875,4 Litros (1.000 gal) de NaClO.....	37
Tabela 2. 4. Comparativo de composições de águas minerais naturais.....	38
Tabela 2. 5. Indicadores de eficiência de eletrólise de águas naturais dos casos de estudo	41
Tabela 2. 6. Classificação da dureza da água pelo U.S. Geological Survey	46
Tabela 2. 7. Formas de produção de H ₂	62
Tabela 2. 8. Materiais empregados para armazenamento de H ₂ nas formas de hidretos metálicos, complexos e borohidretos	63
Tabela 2. 9. Componentes de uma CaC.....	64
Tabela 2. 10. Camadas de eletrodos de difusão gasosa	65
Tabela 2. 11. Vantagens e desvantagens de diversos tipos de células a combustível	69
Tabela 3. 1. Custo dos insumos para tratamento de água da planta de NaClO que produz 11975 kg H ₂ .mês ⁻¹	85
Tabela 4. 1. Concentrações dos poços da Lagoa Curacao e da Lagoa Ganso com relação a água com 3% NaCl.....	88
Tabela 4. 2. Preço de hipoclorito de sódio no mercado paraguaio para diversas concentrações	89
Tabela 4. 3. Modelo comercial do abrandador de água - ACS.....	94
Tabela 4. 4. Modelos de eletrolisadores para dimensionamento de planta local de NaClO....	98
Tabela 4. 5. Tanque de armazenamento da ELT Elektrolyse Technik.....	104
Tabela 4. 6. Especificações do compressor de diafragma PDC-3-300-600	106
Tabela 4. 7. Consumo de energia elétrica estimado da planta local de NaClO.....	107
Tabela 4. 8. Sistema fotovoltaico da planta local com PVsyst.....	108
Tabela 4. 9. Cenário 1 –equipamentos & insumos da planta	110
Tabela 4. 10. Cenário 2- equipamentos & insumos da planta	111
Tabela 4. 11. Parâmetros de investimento de capital na planta local - Cenário 1 & Cenário 2	112
Tabela 4. 12. Investimento & custos do Cenário 1	113
Tabela 4. 13. Investimento & custos do Cenário 2.....	114

Tabela 4. 14. Venda anual de NaClO e H ₂ da planta.....	115
---	-----

Lista de Abreviaturas e Siglas

AFC - *em inglês*, Célula a combustível alcalina

AHP - Potência de ruptura do ventilador

ANDE - Administração Nacional de Eletricidade (ANDE) do Paraguai

A_{res} - Área do reservatório para evaporação sal solar mensal

BV - *em inglês*, *Bed Volume*

$C_{3\% \text{ c.p.}}$ - Custo da solução a 3% de sal de sódio

CA - Corrente alternada

CaC - Célula a combustível

CC - Corrente contínua

C_c - Custo anual de Capital

CD - Camada difusora

ChH - Chaco Úmido

ChS - Chaco Seco

CL - Camada catalítica

$C_{O\&M}$ - Custo anual de Operação e Manutenção.

COMIP - Comissão Mista do Rio Paraná

COVID-19 - *em inglês*, Coronavirus Doença Infecciosa

C_p - calor específico da água

$C_{p,y}$ - Custo de solução de águas naturais

CP - Capacidade de produção de hidrogênio da planta

C_s - Concentração de sal da solução

C_u - Custo unitário da planta de eletrólise

C_w - Concentração de sal da solução no abrandador

D_{aq} - Demanda térmica do aquecedor

D_{ch} - Demanda térmica do chiller

DEFC - *em inglês*, Célula a combustível de etanol direto

DMFC - *em inglês*, Célula a combustível de metanol direto

DOE - *em inglês*, Departamento de Energia dos Estados Unidos

EDG - Eletrodo de difusão gasosa

FOB - *em inglês*, *Free On Board*

FRC - Fator de recuperação de capital anual

FRP - *em inglês*, Polímero reforçado com fibra

GDL - *em inglês*, Camada difusora de gases.

GIZ - *em alemão*, Agência Alemã de Cooperação Internacional

gpm - galão por minuto

HSC - *em inglês*, *high surface area carbon*

HVAC - *em inglês*, *Heating, Ventilation and Air Conditioning*

LEL - *em inglês*, *Low Explosive Level*

M_{ar} - massa molar do ar diária

MCFC - *em inglês*, Célula acombustível de carbono fundido

ME - eficiência elétrica

MEA - *em inglês*, Conjunto de electrodo de membrana

M_{H_2} - massa molar de hidrogênio diário

n.a. - não adquirido

OA - Seção transversal do duto do ventilador

OEC - *em inglês*, *Observatory of Economic Complexity*

PAFC - *em inglês*, Célula a combustível de ácido fosfórico

PCHs - Pequenas centrais hidrelétricas

PEAD - Polietileno expandido de alta densidade

PEMFC - *em inglês*, Célula a combustível de membrana trocadora de prótons

PFSA - Ácido perfluorossulfônico

PTI - Parque Tecnológico Itaipú

PVC - *em inglês*, Cloreto de polivinila

Q_{ag} - vazão mensal de água bombeada do poço ao reservatório.

Q_{ar} - taxa vazão volumétrica do ar

Q_p - vazão diária de entrada ou reposição de água salgada do poço

Q_{rg} - vazão volumétrica regenerante

Q_s - vazão diária de saída do tanque saturador de salmoura

SAC - *em inglês*, *Strong acid cation*.

SAY - Sistema Aquífero Yrendá

SFV - Sistema solar fotovoltaico

SIN - Sistema Interligado Nacional

SOFC - *em inglês*, Célula a combustível de óxido sólido
T&D - Transmissão e distribuição
 t_c - Tempo de contato do regenerante com o leito de resina
TDS - *em inglês*, Total de sólidos dissolvidos
TE - Eficiência total
 T_{evap} - Taxa de evaporação média de chuva
TIR - Taxa Interna de Retorno de Capital
TP - Pressão total
 T_{prec} - Taxa de precipitação média de chuva
UHEs - Usinas hidrelétricas
UNA - Universidade Nacional de Assunção
 V_a - Volume do abrandador selecionado
 V_{ar} - Velocidade do ar
VP - Velocidade de pressão
VPL - Valor Presente Líquido
 V_s - Volume de solução de salmoura do tanque
 V_w - Volume de água no abrandador
WAC - *em inglês*, *Weak acid cation*
WBA - *em inglês*, *Weak base anion*
Wt% - *em inglês*, *weight percent available*
YSZ - *em inglês*, *ytria stabilized zirconia*
 ΔT - diferença de temperatura

Substâncias e compostos químicos:

B - Boro
Ca - Cálcio
 Cl^{1-} - Íon cloreto
CO - Monóxido de carbono
 CO_2 - Dióxido de carbono
 CO_3^- - Íon carbonato
Cr - Cromo
 F^- - Íon fluoreto

Fe - Ferro

FeTi - Ferro-titânio

H₂ - Hidrogênio

H₂O - Água

H₂SO₄ - Ácido sulfúrico

H₃O - Ozônio ou hidrônio

HCl - Ácido clorídrico

HCO₃⁻ - Íon bicarbonato

Hg - Mercúrio

K - Potássio

KCO₃ - Carbonato de potássio

KOH - Hidróxido de potássio

La - Lantânio

Li - Lítio

LiAlO₂ - Aluminato de lítio

LiCO₃ - Carbonato de lítio

Mg - Magnésio

Mn - Manganês

N₂H₄ - Hidrazina

Na - Sódio

Na₂CO₃ - Carbonato de sódio

NaCl - Cloreto de sódio

NaClO - Hipoclorito de sódio

NaClO₃ - Clorato de sódio

NaCO₃ - Carbonato de sódio

NaOH - Hidróxido de sódio

NH₃ - Amônia

NH₃-N - Nitrogênio amoniacal

NH₄⁺ - Íon amônio

Ni - Níquel

NO₃⁻ - Íon nitrato

PO₄³⁻ - Íon fosfato

PtCo - Platina-cobalto

SiO₂ - Sílica

SO₄²⁻ - Íon sulfato

Sr - Estrôncio

ZnO - Óxido de zinco

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Objetivos.....	21
1.2. Justificativa.....	22
1.3. Delimitação.....	23
1.4. Estrutura	23
2. REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1. Mercado de NaClO no mundo e no Paraguai	25
2.2. Características da Água Salgada no Chaco Paraguai	27
2.3. Produção do NaClO	36
2.3.1. Plantas de Produção On-site	42
2.3.2. Planta Modelo de Produção no México.....	45
2.4. Oferta de Energia Elétrica Existente e Prevista.....	58
2.5. Produção e uso energético de H ₂	61
2.5.1. Sistemas de armazenamento de H ₂	61
2.5.2. Utilização em Células a Combustível (CaC).....	63
3. METODOLOGIA.....	70
3.1. Levantamento de Dados da Água Salgada no Chaco Paraguai	71
3.2. Determinação do Volume de Produção da Planta de NaClO	72
3.3.Determinação dos cenários de funcionamento e dimensionamento dos equipamentos	73
3.4. Dimensionamento dos equipamentos da planta local de produção de NaClO	74
3.4.1. Tanque saturador de salmoura.....	75
3.4.2. Abrandador de água.....	76
3.4.3. Aquecedor de água	77
3.4.4. Resfriador de água (Chiller)	78
3.4.5. Eletrolisador	78
3.4.6. Ventilador do tanque de hipoclorito de sódio.....	79
3.4.7. Bombas de água e alimentação.....	80
3.4.8. Reservatório externo.....	81
3.4.9. Sistema de armazenamento de hidrogênio	82
3.4.10. Célula a Combustível (CaC).....	83

3.4.11. Sistema Solar Fotovoltaico (SFV).....	83
3.5. Estimativa dos Custos dos Cenários de Funcionamento	84
3.6. Análise de Viabilidade Econômica dos Cenários.....	86
4. RESULTADOS E ANÁLISE.....	87
4.1. Levantamento de Dados da Água Salgada do Chaco Paraguai.....	87
4.2. Determinação do Volume de Produção da Planta de NaClO	88
4.3. Dimensionamento dos Equipamentos da Planta Local.....	91
4.3.1. Tanque saturador de salmoura.....	91
4.3.2. Abrandador de água salgada.....	93
4.3.3. Aquecedor de Água	96
4.3.4. Chiller ou Resfriador de Água.....	96
4.3.5. Eletrolisador	97
4.3.6. Ventilador e tanque de hipoclorito de sódio	99
4.3.7. Bombas de água e alimentação.....	101
4.3.8. Reservatório externo.....	103
4.3.9. Sistema de armazenamento de H ₂	104
4.3.10. Célula a Combustível (CaC).....	107
4.3.11. Sistema Solar Fotovoltaico (SFV).....	107
4.4. Estimativa dos Custos dos Cenários de Funcionamento	109
4.5. Análise de Viabilidade Econômica dos Cenários.....	115
5. CONCLUSÕES	119
5.1. Propostas de Estudos Futuros	121
6.Referências Bibliográficas.....	122
ANEXO A - Especificação do tipo de água e localização, lagoas e poços na região Yacaré Sul	137
ANEXO B - Lagoas e Poços Riacho Yacaré Sul. Estudo físico-químico.....	140
ANEXO C - Profundidade dos poços perfurados para pesquisa no Chaco Central	141
ANEXO D - Análise físico-químico	142
ANEXO E - Sistema SFV simulado em PVsyst	149
APÊNDICE - Artigo publicado.....	152

1. INTRODUÇÃO

O setor elétrico do Paraguai se destaca pelo uso de fontes renováveis de energia, com o predomínio das grandes centrais hidrelétricas na geração nacional. Devido à intermitência característica da oferta dessas fontes, a adoção de sistemas de armazenamento são uma alternativa para garantir o suprimento ininterrupto. No caso da geração hidráulica, o armazenamento de energia é feito em reservatórios de água nas usinas. Para as outras fontes renováveis, existem outras formas de armazenamento de energia, como a térmica, as células de bateria eletroquímicas e o hidrogênio (H_2).

No caso do H_2 , as tecnologias para sua produção e seu armazenamento estão em constante evolução, permitindo que sua aplicação como vetor energético possa atingir vários setores, como o setor elétrico e o setor de transportes. No setor elétrico, o H_2 pode ser usado juntamente à célula a combustível para converter o gás em eletricidade, como ocorre na geração distribuída e em sistemas de backup de energia. No caso do setor de transportes, cresce em vários países a adoção da mobilidade a partir de veículos elétricos *plugin* à bateria e veículos elétricos com células a combustível.

A produção mundial de H_2 ocorre principalmente a partir do processo de reforma de gás natural, contribuindo para intensificar as emissões de gases de efeito estufa. No entanto, é possível também promover a produção de H_2 com menor impacto às mudanças climáticas seguindo a rota eletrolítica a partir de fontes renováveis de energia. Utilizando células eletrolíticas é possível obter este gás a partir da água e da energia elétrica. Dentre as diversas tecnologias existentes, as células do tipo alcalino são amplamente utilizadas na indústria. O tipo de eletrólito utilizado pode ser o hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio, sendo que a eletrólise do cloreto de sódio ($NaCl$) permite obter tanto o H_2 como o hipoclorito de sódio ($NaClO$), um produto químico amplamente utilizado em diversos segmentos, desde o industrial até em sistemas de tratamento de água e na limpeza de residências (CORREIA-SOUSA, 2013). A demanda deste produto químico no Paraguai tem crescido nos últimos anos, sendo necessário importar $NaClO$ já que a produção nacional não é suficiente.

Assim, considerando o aumento da procura por $NaClO$ e a situação mundial de incertezas da provisão de produtos por parte dos mercados externos, como por exemplo em condições de pandemia como o vivenciado desde o início de 2020 em vários países, torna-se estratégica a produção local deste produto. Para a produção industrial de $NaClO$, existem

plantas de eletrólise da água do mar que, ao aplicar diretamente eletricidade, geram este produto químico a baixas concentrações. O H_2 obtido como subproduto é ventilado para a atmosfera, não sendo comercializado ou aproveitado energeticamente.

Considerando que água e sal são necessários para a produção de NaClO, uma fonte de água salgada é fundamental para sua produção. Na Região Ocidental do Paraguai, também conhecida como Chaco paraguaio, existem vários estudos que mostram a existência de água salgada em poços e lagoas com conteúdo de sais em proporções iguais ou superiores às do mar (CRISTALDO, 2002). A análise do aproveitamento desta água para a produção de NaClO pode ser uma alternativa para promover a produção local.

A região em questão é principalmente caracterizada pelo clima semi-árido e sub-úmido, com temperatura média de 25°C e máximas de mais de 45°C no verão. No Chaco central existem comunidades indígenas autóctonas, além de colônias de origem germânicas. As principais são a Colônia Ferheim, Colônia Menno e a Colônia Neuland, sendo os centros administrativos as cidades de Filadelfia, Loma Plata e Neu-Halbstadt, respectivamente.

Em função das alterações ambientais e dos impactos na disponibilidade dos recursos naturais, o planejamento energético torna-se necessário em relação à produção de energia para uma planta local, dado que nem sempre a fonte elétrica pode estar perto da fonte de água salgada. Portanto, uma fonte renovável, como a energia solar fotovoltaica, pode ser uma opção energética para o atendimento da demanda de uma planta de NaClO em regiões como a do Chaco paraguaio (CHINELLO, 2019).

Assim, considerando que a rota eletrolítica utilizando células do tipo alcalina permite a produção de NaClO e de H_2 ; que o Chaco paraguaio pode prover a água salgada, necessária como insumo no processo eletrolítico, e a energia solar, para garantir o atendimento elétrico da planta produtiva; e que ainda não existe uma planta local de produção de hipoclorito e H_2 eletrolítico que aproveite água salgada natural no país, esta tese propõe avaliar a implantação de uma planta de NaClO na região do Chaco, atendida por um sistema de geração distribuída com fontes renováveis ou por um sistema conectado à rede de distribuição.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desta tese é avaliar técnica e economicamente uma planta local de produção de NaClO e H_2 no Chaco paraguaio utilizando energia elétrica de um sistema híbrido solar fotovoltaico/ H_2 /célula a combustível isolado (chamado de Cenário 1) ou de uma

rede de distribuição (Cenário 2). A partir de uma fonte de água salgada local, pode-se gerar e armazenar o H_2 eletrolítico para reutilizá-lo na própria planta por meio de uma célula a combustível (CaC).

Para atingir o objetivo principal desta tese, os objetivos específicos são:

- (i) Estimar o volume de NaClO importado que deve ser produzido localmente;
- (ii) Avaliar a qualidade da água salgada na região do Chaco e a possibilidade de aproveitamento para a produção de NaClO;
- (iii) Dimensionar os equipamentos da planta local de hipoclorito pela produção de cloro diário;
- (iv) Determinar os cenários de funcionamento da planta local de acordo com a fonte de energia elétrica;
- (v) Dimensionar o sistema híbrido de geração distribuída a partir da energia solar fotovoltaica e do H_2 , e o sistema conectado à rede de distribuição;
- (vi) Coletar e analisar os dados econômicos para a análise de viabilidade econômica da planta local nos dois cenários.

1.2. Justificativa

Diante da perspectiva de um uso energético em indústrias químicas menos impactante ao ambiente e de uma alternativa de produção local com insumos nacionais, esta tese visa contribuir para a produção diferenciada de NaClO e de H_2 , otimizando o uso de água salgada existente no Chaco paraguaio, utilizando fontes renováveis de energia locais e, ainda, promovendo a eficiência energética com o aproveitamento do H_2 , um subproduto do processo. Uma planta autosuficiente quanto aos insumos de produção, com abundante água salgada subterrânea e energia elétrica renovável constitui uma novidade para o país.

No caso específico da geração distribuída, quando a irradiação solar é superior ao valor de dimensionamento do sistema fotovoltaico, o excedente de eletricidade gerado pelo sistema elétrico pode atender à demanda de consumidores próximos à planta, ampliando os benefícios socioambientais desta rota tecnológica.

Além disso, os estudos envolvendo o uso do H_2 como vetor energético vêm crescendo em vários países, havendo algumas iniciativas no Paraguai no âmbito da Universidade Nacional de Assunção (UNA) e do Parque Tecnológico Itaipu (PTI) para aprofundar as

pesquisas, incluindo o direcionamento do uso no setor de transportes, em veículos elétricos com CaC, o que denota a importância do tema no planejamento energético do país.

Por último, porém não menos importante, no cenário atual de intensificação dos hábitos de higiene das pessoas e de cuidados frequentes de desinfecção das superfícies de contato para evitar contágios por doenças infecciosas ocasionadas por vírus e bactérias, a garantia do suprimento de NaClO é fundamental no combate a pandemias como do COVID-19, vivida no mundo em 2020.

1.3. Delimitação

O trabalho consistiu na avaliação técnica e econômica de uma planta de eletrólise local, com produção de NaClO e H₂, considerando cenários nacionais de preços de eletricidade fora da ponta de carga, preços dos insumos no mercado, equipamentos utilizados na produção, assim como dados de medições históricas de irradiação solar e análise química da água salgada subterrânea, com características específicas da região do Chaco paraguaio.

Aspectos ambientais, como emissões de carbono evitadas pelo uso de fontes renováveis locais; a análise de outros subprodutos que a planta pode produzir, como o ácido clorídrico; e a avaliação do uso do H₂ fora da planta produtiva não fazem parte dos objetivos da tese.

1.4. Estrutura

Esta tese está estruturada em cinco capítulos.

O Capítulo 1 corresponde à Introdução, apresentando brevemente o contexto e importância do tema, os objetivos, as justificativas e delimitações da tese.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos temas centrais da tese, tais como a caracterização da região do Chaco Paraguai, as fontes de águas naturais, geração de NaClO por eletrólise, importação de NaClO, fontes e consumo de energia. O estado da arte do armazenamento de H₂ e seu uso em CaC também são mostrados neste capítulo.

O Capítulo 3 trata da metodologia de pesquisa, em que se apresentam os procedimentos necessários para o desenvolvimento do estudo: levantamento de dados de poços e fontes de água salgada, determinação do volume importado de hipoclorito, capacidade de produção e dimensionamento da planta local, determinação dos cenários de oferta de energia elétrica para

a planta, dimensionamento dos sistemas de suprimento elétrico e estimativa dos respectivos custos para a avaliação econômica.

No Capítulo 4 são descritos os resultados obtidos seguindo a metodologia proposta e a avaliação econômica dos cenários de oferta de energia elétrica definidos, sendo possível também avaliar parâmetros que podem influenciar na atratividade dos cenários.

Finalmente, o Capítulo 5 destaca as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os temas centrais para o desenvolvimento da tese. Inicia-se relatando o contexto paraguaio de mercado e importação de NaClO, enfatizando a importância de uma produção local para atender a demanda interna. Em seguida, diante da possibilidade de aproveitar os recursos hídricos locais para a produção de NaClO, é apresentada a caracterização desses recursos no subsolo do Chaco paraguaio, onde as concentrações, composição química da água salgada e as localizações dos poços e reservatórios permitem identificar os lugares mais adequados para a instalação de uma planta de hipoclorito. Em seguida, a tecnologia de produção de NaClO a partir da salmoura é detalhada, dando destaque aos diversos equipamentos necessários, às formas de energia demandadas no processo (em especial à energia elétrica de usinas hidrelétricas e sistemas fotovoltaicos), ao H₂ obtido como subproduto e às tecnologias de seu armazenamento e de sua conversão em energia elétrica a partir da CaC.

2.1. Mercado de NaClO no Mundo e no Paraguai

O NaClO é um composto químico inorgânico, comercialmente disponível em forma líquida, com aplicações diversas na indústria, tais como para manufatura de outras substâncias, no tratamento de produtos têxteis e como um poderoso biocida em plantas auxiliares (como no tratamento de água para sistemas de resfriamento). Além disso, é utilizado como desinfetante de piscinas públicas e no suprimento de água municipal, assim como popularmente para limpeza e branqueamento em residências (CORREIA SOUZA, 2013; KALANTARI, 2014).

De acordo com o *Observatory of Economic Complexity* (OEC), a produção mundial de NaClO vem crescendo nos últimos anos, sendo que em 2017 a exportação foi de 585 milhões US\$. O principal exportador foi a China, com o 26% do total e 185 milhões US\$, seguido dos Estados Unidos com (75,4 milhões US\$), Japão (52,1 milhões US\$), Canadá (33 milhões US\$) e Alemanha (24 milhões US\$) (OEC, 2020).

Por outro lado, os principais importadores são Estados Unidos (43,3 milhões US\$), França (42,7 milhões US\$), Rússia (28 milhões US\$), Bélgica e Luxemburgo (\$22,7 milhões

US\$) e Canadá (21,1 milhões US\$) (OEC, 2020). Em 2017, o Paraguai importou o montante de 894 mil US\$ de NaClO, o que junto com outros produtos químicos representam 13,6% da importação total do país. O principal provedor é o Brasil, com 78% do mercado e 693 mil US\$ em valor importado, seguido da China com 22% e 201 mil US\$ importado. A exportação, por outro lado, atingiu 18,1 mil US\$, destinado ao mercado brasileiro na sua totalidade. A Figura 2.1 mostra a evolução da importação paraguaia entre 2006 e 2016 (OEC, 2020).

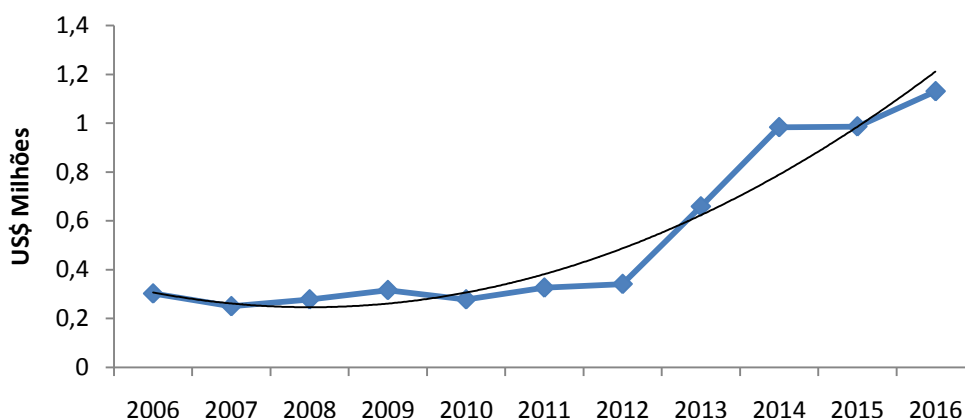


Figura 2. 1. Importação de NaOCl do Paraguai entre 2006 e 2016

Fonte: OEC (2020).

Praticamente todo o NaClO produzido no Paraguai vem da empresa FLUODER S.A., localizada na cidade de Villeta, a 36 km de Assunção. A empresa produz também quase a totalidade de outros produtos químicos, tais como hipoclorito de cálcio, ácido fluorídrico, enxofre, ácido sulfúrico, ácido clorídrico, sulfato de alumínio, policloreto de alumínio, soda cáustica e cloro líquido. Entre os principais clientes estão empresas públicas, de tratamento de efluentes, indústrias químicas locais, indústria de papelão, do setor de couro, do setor agrícola, de fabricação de produtos para piscinas, produtos de desinfecção e sanitários, entre outros (FLUODER, 2020).

Considerando a tendência crescente de importação deste produto, o investimento em uma produção local de NaClO no Paraguai se torna um objeto de estudo importante, especialmente diante da possibilidade de aproveitamento da água salgada, que é o foco desta tese. Assim, a seguir é apresentada a avaliação dos recursos hídricos para a produção de NaClO no Chaco paraguaio.

2.2. Características da Água Salgada no Chaco Paraguuaio

O Paraguai tem uma superfície de 406.752 km², dividida em duas regiões pelo Rio Paraguai, a saber, a Região Oriental e a Região Ocidental ou Chaco. Esta região, mostrada na Figura 2.2, encontra-se na margem direita do Rio Paraguai e tem uma extensão de 246.925 km², abrangendo cerca de 60% do território paraguaio. O Chaco faz fronteira com a Argentina ao Sudoeste, com o Brasil ao Leste e com a Bolívia ao Noroeste. De acordo com as pesquisas estatísticas de projeção da população nacional paraguaia, áreas urbanas e rurais 2000-2025 (DGEEC, 2020), o Chaco apresentava em 2019 uma escassa densidade demográfica de 0,5 hab.km⁻² nos três Departamentos que o compõem, a saber, Presidente Hayes (125.658 habitantes), Boquerón (65.572 habitantes) e Alto Paraguay (17.886 habitantes), representando 3% da população total do país.



Figura 2.2. Mapa do Paraguai e Região Ocidental-Chaco

Fonte: Adaptado de YOURFREETEMPLATES.COM, (2019) e DGEEC (2020).

O Chaco central tem vários assentamentos de colônias de origem germânica menonitas, entre elas a Colônia Ferheim, Colônia Menno e Colônia Neuland. Como mencionado anteriormente, os seus centros administrativos estão nas cidades de Filadélfia, Loma Plata e Neu-Halbstadt, fundadas em 1927, 1929 e 1947 respectivamente. Na região existem também grupos indígenas de famílias guaranis, como os Maskoy, Zamuco e Mataco Mataguayo (DGEEC, 2012).

De acordo com Cristaldo (2002), em 1959 começaram as primeiras pesquisas hidrogeológicas no Chaco central. Flathe et al. (1959) identificaram a presença do aquífero freático em paleocanais¹, preenchido com água de qualidade química predominantemente salgada, com exceção de presença de água doce onde existe condições de infiltração de água da chuva acumulada em depressões naturais dos paleocanais. Bender & Repsol (1970) também fizeram estudos hidrogeológicos e geofísicos na área das colônias menonitas e encontraram resultados semelhantes.

Vários trabalhos e projetos foram realizados sobre os recursos hídricos subterrâneos da região, entre 1980 e 1997, destacando-se os projetos de “Investigações dos recursos de águas subterrâneas do Chaco central e noroeste” (MENTE, 1973) e o “Desenvolvimento de água subterrânea no Chaco” (NAÇÕES UNIDAS, 1978). Em 1989, foi desenvolvido o projeto de estudo de “Prevenção de degradação de terras no desenvolvimento da agricultura para irrigação e drenagem na América latina” GCP/RLA/084/JPN (FAO, 1998). Neste mesmo ano, Hatta (1989) realizou estudos que indicaram que, apesar do alto conteúdo salino da água freática, não era de se esperar um aumento da salinização dos solos da região, especialmente no extrato superficial, devido à taxa de precipitação existente e à relativa grande profundidade do nível estático da água freática, chamando a atenção sobre a possível contaminação deste aquífero pelos poços sanitários. Entre 1992 e 1997 foi realizado o projeto de “Exploração e Aproveitamento dos Recursos Hídricos do Chaco Paraguai”, pela Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ²) e o Governo Paraguai, com 25 informes resumidos no trabalho de Fariña Larroza (2001).

No Chaco paraguai existem quatro sub-bacias (ou sub-cuencas, em espanhol): Curupaity ao Norte, Carandaity a Oeste, Pirity (Pirizal ou de Lomas Olmedo) a Sudeste e Pilar ao Sul. As sub-bacias estão separadas pelo Alto do Chaco central e os arcos de Cerro León (Izozog, como é conhecido na Bolívia), Boquerón (Michicola na Argentina) e Hayes

¹ Paleocanais são antigos canais do rio Pilcomayo preenchidos de sedimentos não consolidados (CRISTALDO, 2002)

² Em alemão, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.

(Quirquincho na Argentina). A Figura 2.3 mostra tais sub-bacias no Chaco do Paraguai, compreendida entre os rios Paraguai (fronteira com Brasil) e Pilcomayo (fronteira com Argentina).

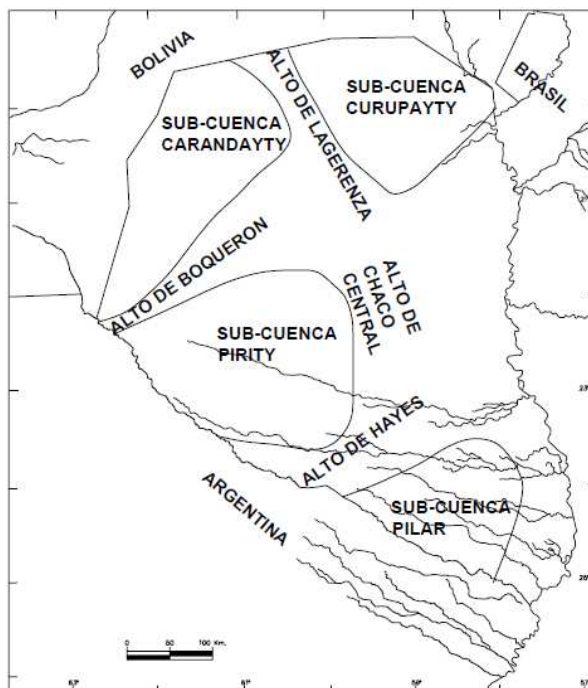


Figura 2. 3. Bacias no Chaco paraguaio

Fonte: Banks & Diaz de Vivar (1975).

A Figura 2.4 mostra o Mapa Hidrogeológico do Paraguai, com seus principais rios e afluentes. Os rios Paraguai e Pilcomayo ressaltam no Chaco como os mais importantes cursos hídricos perenes. O rio Pilcomayo é tributário do rio Paraguai, que possui uma sub-bacia maior. Ao norte do rio Pilcomayo, e paralelo ao mesmo, encontram-se seus antigos sistemas de drenagem e uma série de canais pouco alongados, como os rios Confuso, Aguaray Guazú, Negro, Montelindo, Siete Puntas e Verde.

De acordo com Kruch & Rojas (1996), a drenagem do Chaco é determinada principalmente por:

- Condições de precipitação dos Andes e no Chaco;
- Relevo pouco pronunciado;
- Menor infiltração pelo relevo;
- Contato permanente ou temporal com água subterrânea;
- Processos anteriores morfogenéticos, fluviais, determinantes para sistemas de drenagem mais jovens;

No Chaco Seco, onde encontra-se a área de estudo, especificamente no Chaco central, as águas subterrâneas são importantes pela ausência de águas superficiais perenes. No Chaco Úmido, aparecem rios pequenos e temporais de baixa vazão e alta salinidade em época de estiagem, evidenciando um aporte substancial dos aquíferos salgados, devido aos níveis de água subterrânea salgada se encontrarem próximos à superfície (CRISTALDO, 2002; GODOY, 1989).

Além da subdivisão, um dos aspectos mais importantes relacionado com as águas subterrâneas é a regionalização. A regionalização dos aquíferos, em nível nacional ou continental, pode ser representada através da divisão em províncias hidrogeológicas. Uma província hidrogeológica pode ser definida como uma região de características semelhantes quanto às condições de ocorrência de água subterrâneas, fatores geológicos e fisiográficos (UNESCO/CPRM, 1996). Na América do Sul existem 16 províncias hidrogeológicas. A província Pantanal-Chaco-Pampeano constitui uma delas e é composta por três sub-províncias que se denominam: sub-província Pantanal, sub-província Chaco e sub-província Pampeano, sendo grandes depressões estruturais preenchidas por sedimentos de idade e espessura variáveis.

A sub-província Chaco, ao qual pertence o Chaco paraguaio, é a região fisiográfica com clima sub-úmido e semi-árido, situada no setor ocidental do Paraguai, com uma extensão ao Oeste no território da Bolívia e continuando ao Sul, no setor Norte da Argentina. Esta sub-província corresponde a uma grande bacia sedimentar preenchida por alguns milhares de metros de sedimentos, variando sua idade geológica do Paleozóico até o período recente (UNESCO/CPRM, 1996).

Nesta sub-província, encontra-se o Sistema Aquífero Yrenda (SAY), o qual se estende por quase todo o Chaco, representado por aquíferos confinados e semiconfinados. Até 350 metros de profundidade, a qualidade das águas vai de doce à salgada, de acordo com Cristaldo (2002) e Godoy (1989).

O aquífero freático é denominado aquífero paleocanal por encontrar-se em paleocanais preenchidos de sedimentos. Os paleocanais foram formados pelo rio Pilcomayo quando este encontrava-se no Chaco central. Posteriormente ele foi deslocando-se até sua posição final no Sul. O único recurso de água subterrânea do Chaco central constitui as lentes ou bolsões no aquífero paleocanal, os quais contêm água doce ($<1.000 \text{ mg.L}^{-1}$), águasalobra ($1.000 - 10.000 \text{ mg.L}^{-1}$) em ambiente de água salgada ($>10.000 \text{ mg.L}^{-1}$) (CRISTALDO, 2002).

A Figura 2.5 mostra o perfil das águas subterrâneas do Chaco, cruzando a região Ocidental desde o ponto A até o ponto B, indicado no mapa acima do perfil. Além disso,

mostra-se a variação da qualidade da água, em cor azul claro - a água salgada - e azul escuro - a água doce e salobra. Também se destaca o sentido do fluxo de água na região, como o perfil de altitude até o rio Paraguai. Nele pode ser considerado uma mistura das águas em algumas localidades e a presença de água salgada predominante em outras.

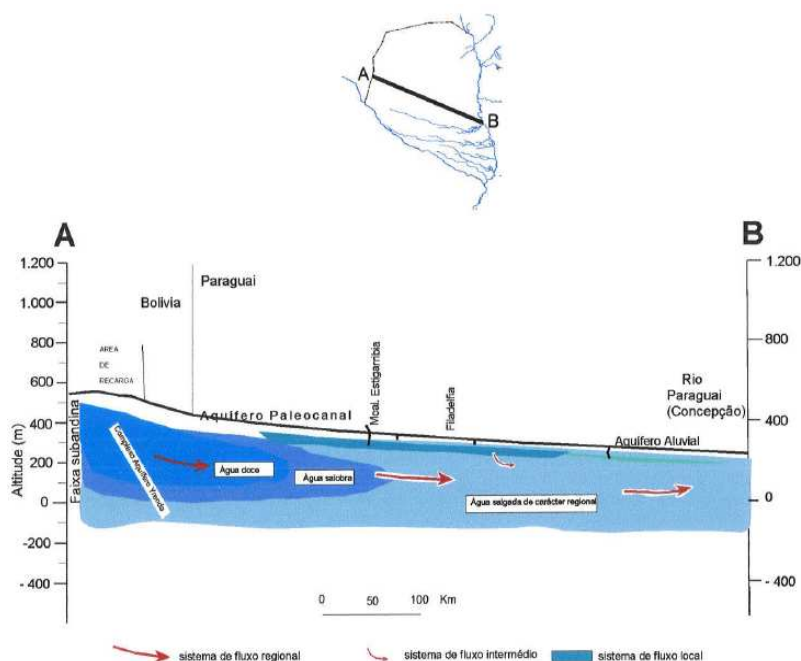


Figura 2. 5. Modelo de perfil das águas subterrâneas no Chaco

Fonte: Cristaldo (2002).

Quanto à composição química das águas subterrâneas, a sua quantidade e qualidade são de importância fundamental para o Chaco. O consumo destas águas destina-se aos mais diversos usos, como o consumo humano, agrícola, criação de gado (estimado em 40 a 50 litros por animal) e, por último, o industrial. De acordo com a classificação da qualidade da água subterrânea, baseada em Davis & De Wiest (1967), a Tabela 2.1 mostra os tipos de água em função do total de sólidos dissolvidos (TDS) em mg.L^{-1} .

São vários os poços que podem ser aproveitados, os quais estão cadastrados desde 1992 na área de Filadelfia; de 1993 até 1995 em Loma Plata; e desde 1995 em Neu Habstadt. Uma coletânea dos dados encontra-se no Anexo D da tese (CRISTALDO, 2002) indicando: o proprietário do poço, a localização e coordenadas geográficas, tipo de dutos, tipo de bomba utilizada, condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$), profundidade do poço e data de amostra.

Tabela 2. 1. Classificação da qualidade da água subterrânea

Tipo	TDS (mg.L ⁻¹)
Água doce	≤ 1000
Água salobra	1000 -10000
Água salgada	10000 – 100000
Salmoura	> 100000

Fonte: Adaptado de Davis & De Wiest (1967).

A condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$ @ 25° C) é uma propriedade importante na produção de hipoclorito. A partir dela é possível fazer uma correlação entre as concentrações de íon sulfato (SO_4^{-2} , em mg.L^{-1}) nas águas subterrâneas, o qual combina-se com o cálcio, formando uma incrustação aderente que retarda a transferência de calor. Algumas indústrias se opõem a concentrações maiores que 250 mg.L^{-1} na água potável. Com mais de 500 mg.L^{-1} , a água tem gosto amargo. Cristaldo (2002), de acordo com Von Hoyer (1993), determinou, em Filadelfia, uma relação linear mostrada na Equação 2.1.

$$\text{Condutividade elétrica } (\mu\text{S.cm}^{-1}) \times 0,375 = \text{SO}_4^{-2} (\text{mg.L}^{-1}) \quad (2.1)$$

A relação entre a condutividade elétrica e o TDS (mg.L^{-1}) é determinada por Cristaldo (2002) conforme Equação 2.2.

$$\text{Condutividade elétrica } (\mu\text{S.cm}^{-1}) \times K_1 = \text{TDS } (\text{mg.L}^{-1}) \quad (2.2)$$

Onde:

K₁: uma constante linear que depende da localidade onde foram tomadas as amostras, sendo 0,831 para Loma Plata; 0,815 para Filadelfia; e 0,797 para Neuland.

De acordo com as características físico-químicas dos mesmos, pode-se determinar a viabilidade de obter NaClO. A Tabela 2.2 mostra os 21 parâmetros físico-químicos analisados dos minerais existentes nos poços e reservatórios de infiltração (tajamares) e respectivos métodos utilizados por Cristaldo (2002). Fariña & Cristaldo (2016) fizeram uma análise do

complexo Sistema Aquífero Yrenda que, dependendo da localização, é considerado para extrair água salgada.

Tabela 2. 2. Parâmetros físico-químicos analisados e métodos

Parâmetro	Método	Parâmetro	Método
pH	Potenciométrico	Boro (B)	Colorimétrico
Condutividade	Ponte Wheastone	Fluoreto (F)	Potenciométrico
Temperatura	Termistor	Sódio (Na)	Absorção atômica
Cloreto (Cl)	Volumétrico	Potássio (K)	Absorção atômica
Carbonato (CO ₃)	Volumétrico	Lítio (Li)	Absorção atômica
Bicarbonato (HCO ₃)	Volumétrico	Cálcio (Ca)	Absorção atômica
Sulfato (SO ₄)	Turbidimétrico	Magnésio (Mg)	Absorção atômica
Fosfato (PO ₄)	Colorimétrico	Estrôncio (Sr)	Absorção atômica
Nitrato (NO ₃)	Colorimétrico	Ferro (Fe)	Absorção atômica
Amônio (NH ₄)	Colorimétrico	Manganês (Mn)	Absorção atômica
Sílica (SiO ₂)	Absorção atômica		

Fonte: Cristaldo (2002).

Todo este levantamento permitiu reunir as condições adequadas de aproveitamento das águas subterrâneas, com mínimos ajustes de concentração, para produzir NaClO no Chaco paraguaio, que é o foco desta tese. Portanto, as águas do tipo salobra e salgada são adequadas para referido caso.

A água salobra no intervalo de (1000-10000 mg.L⁻¹) consiste em águas cloretadas e sulfatadas sódicas e águas que constituem uma mistura deste tipo com bicarbonatadas cálcicas e magnesianas. Normalmente misturam-se com água doce (CRISTALDO, 2002). Já a água salgada é do tipo sulfatada e cloretada sódica.

No diagrama de Piper⁵, visto na Figura 2.6, apresenta-se as amostras de 4 poços de água salgada em Loma Plata. O cátion dominante é o sódio (Na) + potássio (K), seguido de cálcio (Ca⁺²) e magnésio (Mg⁺²). O SO₄⁻² predomina entre os ânions, seguido pelo cloreto (Cl⁻), com muito baixo conteúdo de carbonato e bicarbonato, segundo Cristaldo (2002).

⁵ Diagrama de Piper: gráfico efetivo para a representação de amostras de água em estudos hidrogeológicos. Os percentuais das concentrações dos íons principais, em miliEquivalentes por litro (mEq.L⁻¹), são mostrados no diagrama.

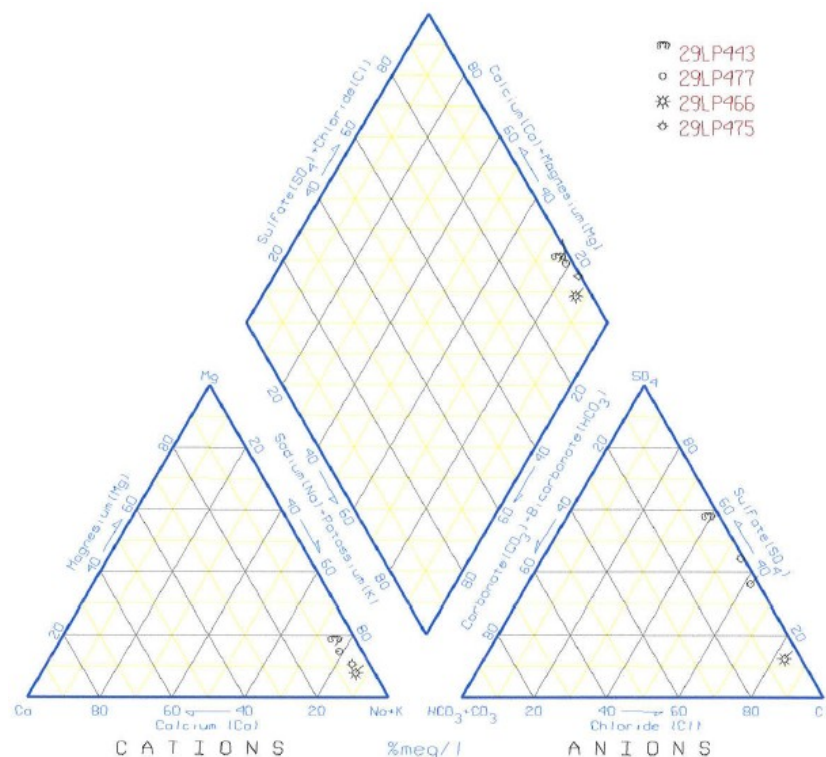


Figura 2. 6. Diagrama de Piper da água salgada de Loma Plata

Fonte: Cristaldo (2002).

As águas cloretadas e sulfatadas ocorrem nas áreas de monte e paleocanais do contexto regional. As fontes de alta salinidade regionais são os evaporitos⁶ dispersos nos sedimentos argilosos. O gesso é o mineral encontrado com frequência nos perfis das perfurações junto com concreções carbonáticas (MENTE & GODOY, 1989).

Outro estudo de Cristaldo et al. (2002) na Bacia Riacho Yacaré Sul mostra a localização, classificação e tipo de água, e seus dados encontram-se no Anexo A. Os resultados da composição química das lagoas, que são também analisadas como potenciais fontes de água com sal, fazem parte do Anexo B desta tese. As lagoas encontram-se na área das colônias menonitas Ferheim e Menno. Cristaldo & García (1991) indicaram que esse fenômeno estaria relacionado à elevação do nível estático⁷, ao desmatamento de grandes extensões de terra para transformá-las em campos de pastagem (NITSCH, M. et al., 1998) e à incidência negativa da barragem que atua no escoamento superficial, isolando o que anteriormente constituía um sistema fluvial interconectado, como mostrado esquematicamente na Figura 2.3 já apresentada.

⁶Evaporitos: rochas sedimentares formadas pela cristalização de sais dissolvidos em lagos e mares costeiros. A maior parte dos depósitos de sal comuns se originaram desta forma. A cristalização requer supersaturação da água salgada.

⁷Nível Estático (N.E.): em metros da superfície.

Quase todas as lagoas estão classificadas como salinizadas. Algumas, como a Lagoa Ganso, até apresentam eflorescências brancas na superfície e vegetação morta na descrição de Cristaldo et al. (2002). Por outro lado, na Lagoa Campo María é utilizado o aquífero freático, na temporada de estiagem, para consumo humano e de gado por meio de um conjunto de poços.

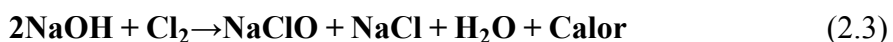
Neste sentido, considerando que vários poços e lagoas na região do Chaco podem ser aproveitados para extrair água salgada ou salobra, é preciso encontrar a concentração adequada e analisar a produção de NaClO, o que é verificado a seguir.

2.3. Produção de NaClO

O NaClO é produzido pela reação de cloro (Cl_2) e soda cáustica (solução de hidróxido de sódio - NaOH) ou diretamente pela eletrólise de NaCl.

Em 1785, o químico francês Claude Berthollet preparou um agente de branqueamento dissolvendo o "gás de Scheele" em água. Em 1789, ele melhorou este líquido clareador misturando-o com uma solução de hidróxido de potássio (KOH). Este trabalho foi realizado numa fábrica química francesa em Javel, uma antiga cidade da França, agora parte de Paris. Essa solução foi chamada água Javelle e ainda é conhecida por esse nome (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010), sendo um poderoso oxidante (ARKEMA, 2013).

Pouco tempo depois, Labarraque substituiu o KOH, composto caro na época, por soda cáustica obtida a partir de carbonato de sódio (Na_2CO_3). Esse desenvolvimento resultou no que provavelmente foi o primeiro uso do NaClO como alvejante. Atualmente, o NaClO é fabricado usando uma modificação do método de Labarraque misturando uma parte de Cl_2 com duas partes de NaOH, obtendo também NaCl e água (H_2O), mostrado na reação química (Equação 2.3).



Para garantir a estabilidade química do NaClO deve-se manter o pH alto, entre 11 e 13. Em valores de pH superiores a 13, a degradação do NaClO é acelerada devido ao aumento da força iônica da solução com excesso de NaOH. Em se mantendo a estabilidade, o NaClO pode ser armazenado e entregue com segurança.

A Tabela 2.3, adaptada do Livro Branco de Black & Veatch Corporation (2010) e com as unidades padrão no Sistema Internacional (e Inglês entre parêntesis), mostra os compostos necessários para a produção de 3.875,41 L (1.000 gal) de NaClO para várias concentrações.

Tabela 2. 3. Quantidade de cloro e soda cáustica para produzir 3.875,4 Litros (1.000 gal) de NaClO

Cloro Disponível			Como NaClO		Peso específico	Excesso NaOH	Cl ₂ necessário	NaOH necessário	
g.L ⁻¹	(%) de venda	Wt % ⁸	g.L ⁻¹	Wt %	21,1°C (70°F)	g.L ⁻¹	kg (lb)	kg (lb)	Litro (gal)
								sólido	50% líquido
10	1	0,98	10,5	1	1,014	1	37,64 (83)	47,17 (104)	60,57 (16)
25	2,5	2,4	26,2	2,5	1,035	2,5	94,8 (209)	118,39 (261)	151,4 (40)
50	5	4,7	52,5	4,9	1,07	5	189,1 (417)	237,23 (523)	302,83 (80)
100	10	8,8	105	9,2	1,14	10	378,3 (834)	474 (1045)	605,7 (160)
120	12	10,3	126	10,8	1,168	12	454 (1001)	568,8 (1254)	726,8 (192)
150	15	12,4	157,5	13	1,21	15	567,4 (1251)	711,2 (1568)	908,5 (240)

Fonte: Adaptado de BLACK & VEATCH CORPORATION (2010).

Para o caso da produção por eletrólise de água com sal, foco desta tese, existe uma dependência da qualidade de sal utilizada, a qual pode ser de água do mar e sais minerais. Para água do mar, evapora-se a água e deixa-se os cristais restantes, chamados de sal solar. O sal solar não é refinado e para obter sal puro, os outros minerais devem ser recrystalizados.

Para os sais minerais ou salmoura que ocorre naturalmente, ou na crosta terrestre, a menos que seja de qualidade excepcional, também se requer tratamento no local. Qualquer salmoura subterrânea deve ser verificada quanto ao teor de nitrogênio amoniacal (NH₃-N), pois essa é uma impureza indesejável na produção eletrolítica de cloro. As impurezas no sal ou na salmoura afetam seriamente a operação e manutenção de qualquer tipo de membrana da

⁸ Wt%: (em inglês) *weight percent available*, é o peso por percentagem (%) disponível.

célula eletrolítica, pois podem escalar e se acumular na célula, interferindo assim em sua capacidade de transmitir eletricidade. Segundo o fabricante Eltech, o teor máximo permitido de Ca^{+2} em salmoura é de $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010), para uma produção de água de mar com sal solar puro a 99%, de forma a gerar menos subprodutos indesejados.

O trabalho de Fesenko et al. (2017) mostra uma análise da viabilidade e eficiência de custos de produção de NaClO a partir de diversas concentrações de águas naturais por meio eletrolítico. Os custos totais de produção da planta, assim como os insumos necessários, são considerados para uma solução de 3% de NaCl. A Tabela 2.4, elaborada pelos mesmos pesquisadores, apresenta diversas concentrações de águas mineralizadas naturais em estações de água, água do mar Negro e água salobra subterrânea na Rússia.

Tabela 2. 4. Comparativo de composições de águas minerais naturais

Índice	Água do Mar Negro		Água subterrânea mineralizada (Estação Melikhovskaya)		Água subterrânea mineralizada (Estação Melikhovskaya) diluída a 3% NaCl		Tabela Solução Sal branca (3% NaCl)		Água subterrânea salobra (Estação Grushevskaya)	
	Concentrações									
	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹
Ca ²⁺	200	10	2000	100	1160	58	130	6,5	176	8,8
Mg ²⁺	733,9	60,4	972	80	449,6	37	54,68	4,5	75,33	6,2
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	933,9	70,4	2972	180	1609,6	95	184,68	11	251,33	15
Na ⁺ + K ⁺	6131,8	266,6	16640,5	723,5	10221,2	444,4	11782,9	512,3	385,25	16,75
HCO ₃ ⁻	183	3	610	10	244	4	189,1	3,1	378,2	6,2
CO ₃ ²⁻	15	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₄ ²⁻	1248	26	960	20	576	12	187,2	3,9	385,25	8,03
Cl ⁻	10919	308	30948	873	18568,7	523,8	18303	516,3	230	6,49
Fe ³⁺	-	-	9,4	0,5	7,5	0,4	-	-	-	-
P, mg.L ⁻¹	19430		52139,9		31227		30646,9		1630	
pH, pc.	8,4		7,4		7,34		7,9		7,6	

Fonte: Adaptado de Fesenko et al. (2017).

Tendo como referência a solução de água pura com 3% de NaCl na quarta coluna de amostras (as concentrações de minerais tanto em mg.L^{-1} como mEq.L^{-1}), fez-se o comparativo das composições de águas: **caso (1)** do mar Negro (*Black sea water*); **caso (2)** de água mineralizada subterrânea, com 3% NaCl, da estação Melikhovskaya no poço Ognemaya; **caso**

(3) de água pura com NaCl a 3%; e **caso (4)** de água salobra subterrânea na estação Grusheyskaya.

A Figura 2.7 mostra a relação entre o tempo de duração de eletrólise e a concentração de Cl_2 , em g.L^{-1} , dos 4 casos de estudo mencionados. Inicialmente não há diferença, mas aos 30 minutos de iniciado o processo, a água do mar Negro (1), em cor amarelo, mostra menor concentração que os casos (2) em cor vermelho e o caso (3) em cor verde. Depois desse tempo, diminui o tempo de residência do eletrólito na célula do eletrolizador.

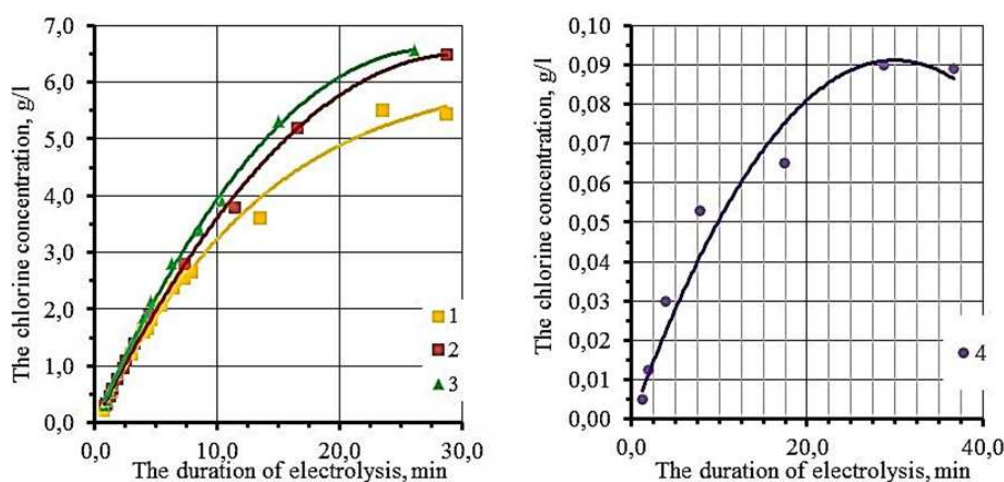


Figura 2. 7. Duração da eletrólise

Fonte: Fesenko et al. (2017).

A Figura 2.8 mostra que durante a eletrólise da solução, o caso (3) é o que tem menor consumo de eletricidade e maior eficiência de energia por quilograma de Cl_2 durante o processo. Para o caso (1), da água do mar Negro, o consumo de energia aumenta, enquanto para o caso (2) os consumos são moderados.

Para determinar a economia da produção de NaClO por eletrólise direta da água natural, foi estimado o custo da eletricidade para eletrólise e determinado o custo unitário de um quilograma de cloro ativo. A quantidade de eletricidade consumida para produzir um quilograma de cloro ativo pode ser calculada de acordo com a Equação 2.4.

$$W = I \cdot U / C \cdot q \quad (2.4)$$

Onde:

W : consumo de energia para a obtenção de 1 kg de cloro ativo (kWh.kg^{-1});

I : intensidade de corrente;

U : tensão da célula eletroquímica;

C : concentração de cloro ativo (g.L^{-1});

q : fluxo do eletrólito ($\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

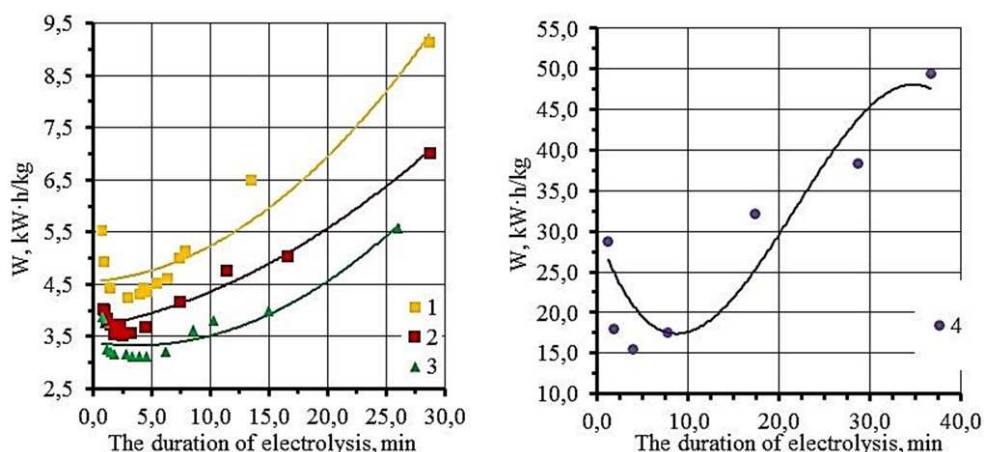


Figura 2. 8. Dependência de consumo de eletricidade para eletrólise

Fonte: Fesenko et al. (2017).

O incremento da duração da eletrólise causa o incremento do consumo de eletricidade para produzir 1 kg de cloro ativo.

A estimativa do custo por quilograma de NaClO , que é a solução a 3% de sal de sódio ($C_{3\% \text{ c.p.}}$), é mostrado na Equação 2.5 no valor de RUB⁹/kg. Para o caso de águas naturais, não precisando comprar sal, o custo ($C_{p.y.}$, também em RUB/kg) seria o mostrado na Equação 2.6.

$$C_{3\% \text{ c.p.}} = W \cdot C_{el} + 5 \cdot C_h \quad (2.5)$$

$$C_{p.y.} = W \cdot C_{el} \quad (2.6)$$

Onde:

C_{el} : custo por kWh de eletricidade (4,06 RUB/kWh em Fesenko et al. 2017);

C_h : custo de um quilograma de sal NaCl (3,5 RUB/kg).

O número 5 na Equação 2.5, multiplicado pelo custo de sal comprado e misturado com água pura para a eletrólise, foi obtido do gráfico da Figura 2.9. A interseção entre o custo unitário (RUB/kg) de produção de 1 kg de cloro nos casos (1) e (3) mostra que em 5 g.L^{-1} é

⁹ RUB: o Rúblio é a moeda oficial da Federação da Rússia. 1US\$ = (61,14 - 56,03) Rublos, em 2017.

mais econômico fazer eletrólise de água do mar Negro, caso (1), do que misturar com sal, caso (3).

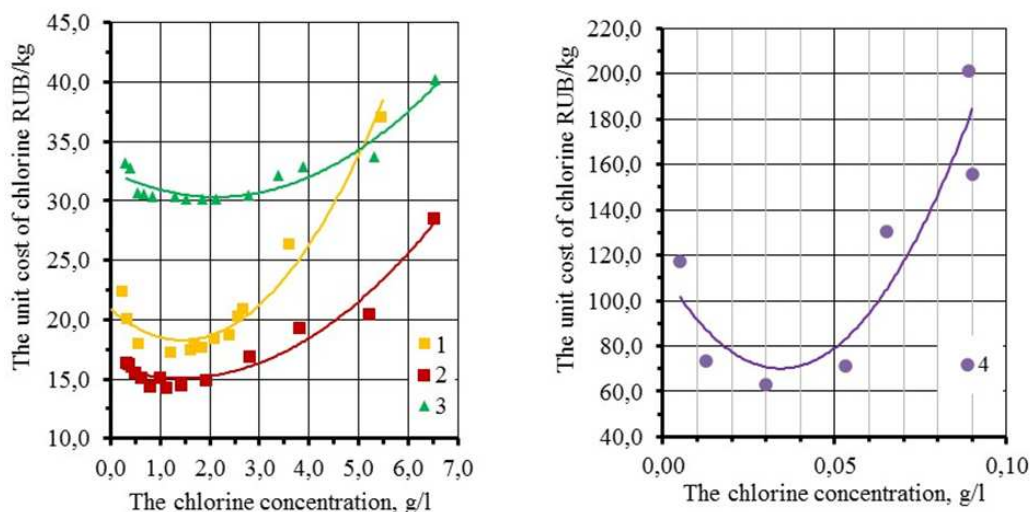


Figura 2. 9. Custo de 1kg de cloro ativo em diversas concentrações

Fonte: Fesenko et al. (2017).

A Tabela 2.5 traz um resumo dos estudos de casos, destacando entre parêntesis a faixa de eficiências ótimas de operação de cada caso. O estudo de Fesenko permitiu comparar a eletrólise direta de águas naturais com concentrações de cloro, entre 230 mg.L^{-1} e 18.6 mg.L^{-1} . Com os ajustes necessários, pode ser estimado para concentração de 3%, adotada nesta tese.

Tabela 2. 5. Indicadores de eficiência de eletrólise de águas naturais dos casos de estudo

Casos (operação ótima eficiência)	Água do Mar Negro	Água subterrânea mineralizada (Estação Melikhovskaya) diluída a 3% NaCl	Solução de Sal NaCl (3%)	Água subterrânea salobra (Estação Grushevskaya)
Concentrações de cloro ativo, g.L^{-1}	0,25-5,5 (1,0-2,0)	0,3-6,4 (1,0-2,0)	0,3-6,6 (1,0-2,0)	0,005-0,09 (0,05-0,03)
Voltagem, V	4,91	3,9	3,72	3,4
W, kWh/kg	4,2-9,1 (4,2-4,5)	3,6-7,0 (3,5-3,7)	3,1-5,6 (3,1-3,2)	15- 49,5 (15-18)
Custo unitário de cloro, \$/kg	17,2-37,1 (17,2-18,3)	12,7-29,8 (14,3-15)	30,1-40,2 (30,1-30,2)	63-201 (63-73)
Saída de corrente de cloro, %	40,9-87,7 (84-87,7)	40,8-81,2 (78-81,2)	50-90 (89,3-90)	36,7-16,6 (14,2-16,6)

Fonte: Adaptado de Fesenko et al. (2017).

2.3.1. Plantas de produção *on-site*

Uma planta de produção de NaClO local (*on-site*) envolve uma variedade de tecnologias e equipamentos. A reação química expressa na Equação 2.7, mostra o que ocorre durante a eletrólise. Neste caso, para produzir NaClO demanda-se de energia elétrica, obtendo-se H₂ como subproduto.



A viabilidade de um sistema de geração de NaClO *on-site* é determinada pelas regulamentações locais e pela análise de custo do ciclo de vida para comparação com outros métodos de desinfecção.

De acordo com Black & Veatch Corporation (2010) uma solução de 0,8% de hipoclorito, a diferença de 12% a 15% em peso, tem as seguintes vantagens: produz menos emissões de gases como resultado da degradação; cristalização mínima no ponto de alimentação; e tem um impacto menor no pH da água final. Apesar da solução de 0,8% ser classificada como de risco à saúde (causador de irritação), ela pode estar isenta das regulamentações estaduais e locais estabelecidas de códigos de incêndio e construção. No entanto, tais regulamentações devem ser examinadas, pois podem ser aplicadas políticas mais rigorosas.

Já a análise de custo do ciclo de vida deve incluir os custos de equipamentos e edifícios, operação e manutenção (O&M), matérias-primas e energia elétrica (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

O processo de geração local de NaClO começa com a preparação de uma solução de salmoura concentrada, diluindo o sal de NaCl, armazenado num tanque de preparo e saturação de salmoura, com água para produzir uma solução de 26,4% em massa. A água ingressa no preparo da salmoura e flui através do anel saturador absorvendo o sal. Através de bombas dosadoras, a solução de salmoura segue para o eletrolizador (célula eletrolítica). A água de diluição passa normalmente pelo processo de abrandamento para reduzir ou eliminar a presença de Ca⁺² e Mg⁺² e evitar o acúmulo de incrustações no interior das células (SZIKSZAY, 2020). A resina catiônica empregada como abrandador pode ser regenerada utilizando a salmoura (ACQUAMÁXIMA, 2020). A Figura 2.10 mostra um diagrama do

fluxo do processo, do abrandamento de água, da preparação da salmoura e das bombas dosadoras de uma planta de produção de NaClO.

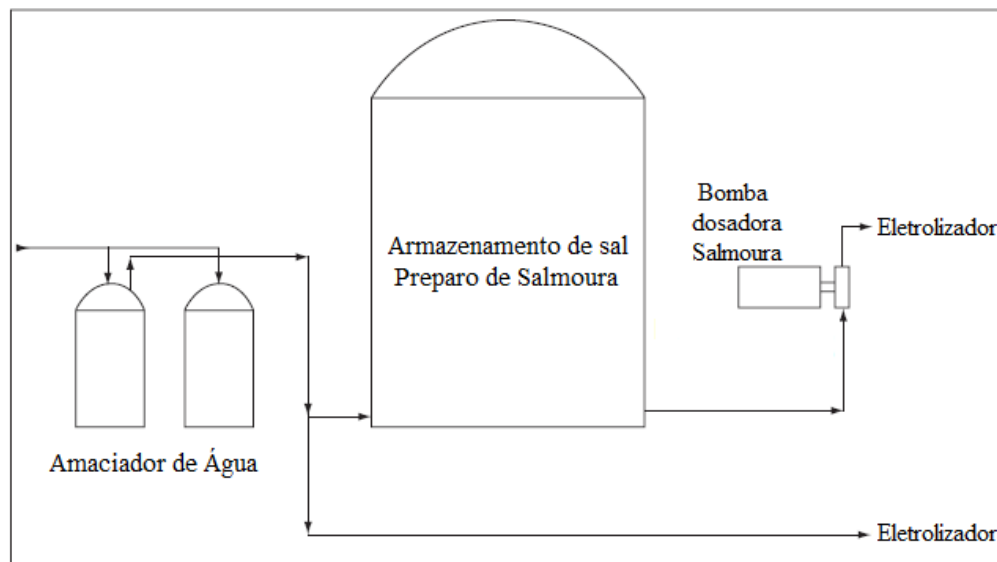


Figura 2. 10. Equipamentos para preparação de salmoura

Fonte: Adaptado de Black & Veatch Corporation (2010).

Como a temperatura da água de diluição abrandada afeta diretamente a eficiência do eletrodo, resfriadores ou *chillers* e aquecedores de água podem ser usados para manter a temperatura da água em uma faixa aceitável. A Figura 2.11 mostra um diagrama de fluxo do processo, o qual inclui não apenas os *chillers* de água, mas também as células eletrolíticas, o tubo vertical e sopradores.

Nas células eletrolíticas, a salmoura é ainda diluída para uma solução de 2,5% a 3%, e entra no eletrolisador, onde eletricidade é fornecida por um retificador dedicado. A reação ocorre na célula, resultando na formação de gás Cl_2 no lado do ânodo e NaOH no lado do cátodo. O gás Cl_2 e o NaOH combinam-se para formar NaClO e gás H_2 . Esses dois produtos são transferidos para o tubo vertical. A mistura entra no tubo vertical na parte superior, de modo que o NaClO líquido caia no fundo e seja armazenado em tanques de armazenamento a granel.

Já o gás H_2 , mais leve que o NaClO, sai por cima no tubo vertical, onde é ventilado. Um soprador mecânico de diluição de H_2 fornece ar para diminuir a concentração de H_2 para um nível não explosivo (LEL¹⁰) antes de ser expelido para a atmosfera. Embora o NaClO nos tanques de armazenamento esteja essencialmente livre de gás H_2 , é recomendável que os

¹⁰LEL, do inglês low explosive level, refere-se ao baixo limite de inflamabilidade e explosividade.

sopradores mecânicos também sejam conectados a cada tanque de armazenamento para manter a concentração de gás H_2 no espaço acima do LEL. A Figura 2.12 mostra o diagrama do fluxo de processo do tanque de armazenamento e das bombas dosadoras. A solução de $NaClO$ é transferida para os pontos de aplicação por bombas dosadoras químicas, que podem ser do tipo diafragma ou peristáltico.

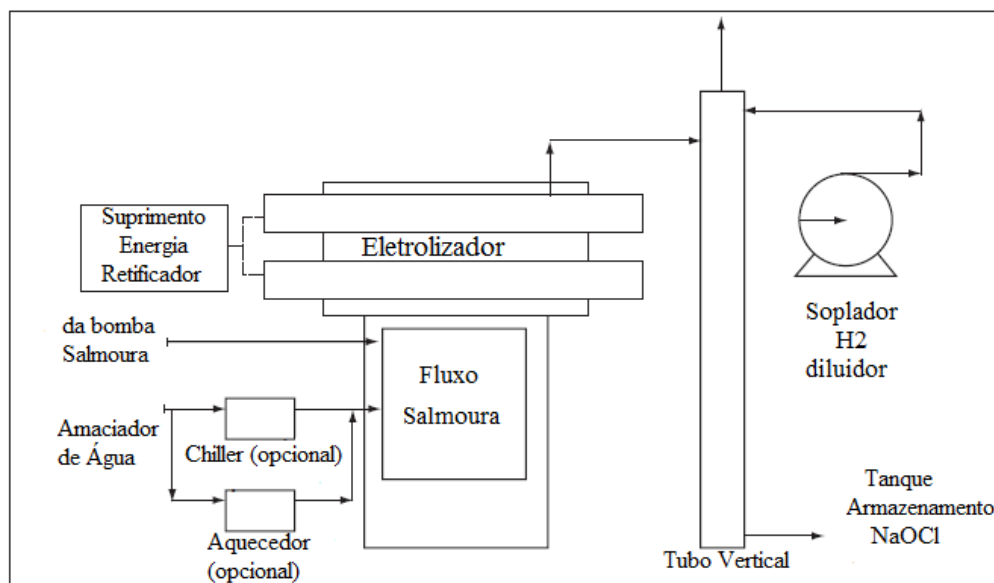


Figura 2. 11. Diagrama do fluxo de processo, eletrolizador e diluição de H_2

Fonte: Adaptado de Black & Veatch Corporation (2010).

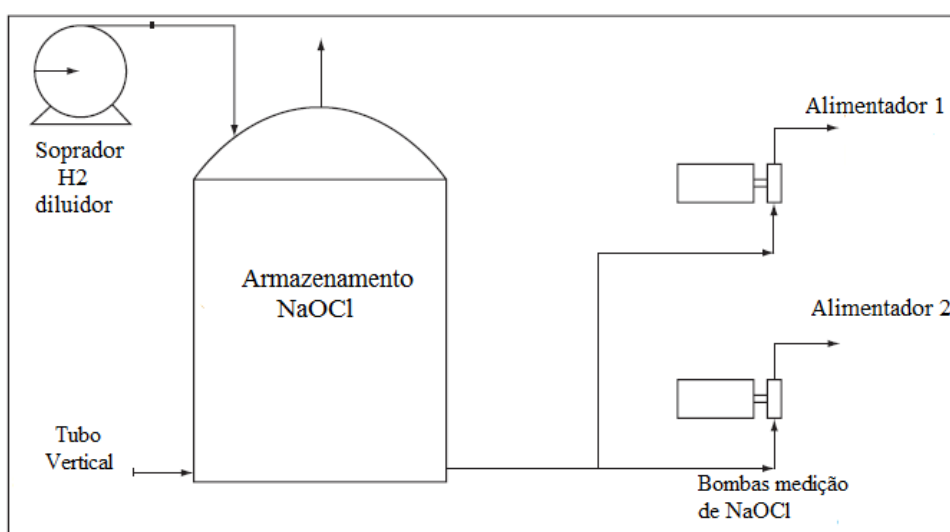


Figura 2. 12. Diagrama do fluxo de armazenamento da $NaClO$ & bombas dosadoras

Fonte: Adaptado de Black & Veatch Corporation (2010).

2.3.2. Planta modelo de produção no México

Uma planta de produção de NaClO no México (SEMARNAT, 2010) foi analisada e serviu como referência para o estabelecimento de vários parâmetros de projeto e operação adotados nesta tese (Capítulos 3 e 4). A Figura 2.13 mostra o esquema de funcionamento da mesma, com os respectivos consumos energéticos e insumos necessários para a sua produção. Os componentes principais do sistema de produção de NaClO são descritos em seguida.

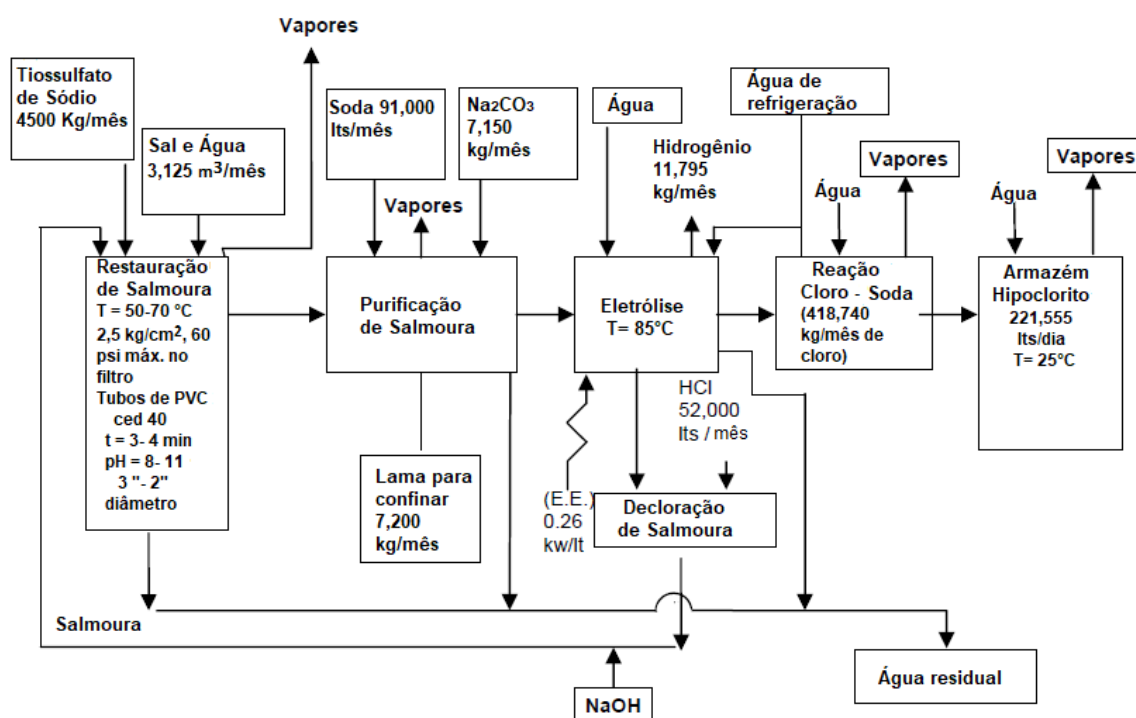


Figura 2. 13. Diagrama de operação e funcionamento da planta de NaClO no México

Fonte: SEMARNAT (2010).

1) **Abrandador de água:** é usado para reduzir a dureza causada por altas concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} , bicarbonatos (HCO_3^-) e sulfatos (SO_4^{-2}) nas águas subterrâneas. Os valores de dureza são tipicamente expressos em mg.L^{-1} de carbonato de cálcio (CaCO_3) e variam dependendo da localização da fonte de água. A Tabela 2.6 mostra os diferentes níveis de dureza, conforme descrito pelo U.S. Geological Survey (USGS) (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

Como já comentado, os íons Ca^{+2} e Mg^{+2} na água podem desenvolver incrustações nos sistemas de tubulações e equipamentos, as quais revestem os eletrodos nas células e, com o tempo, reduz sua eficiência, aumentando assim o consumo de eletricidade. Além disso, pode inibir o fluxo através da célula e causar o bloqueio da saída de NaClO e o H_2 , promovendo

aumento da pressão e, em último caso, o estouro da célula. Idealmente, a dureza da água para sistemas de geração local não deve exceder $17 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$, o que exigiria a limpeza das células a cada 6 meses. Água com dureza de até $40 \text{ mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ pode ser usada, mas a limpeza das células será necessária com mais frequência. Os dados de qualidade da água devem ser coordenados com o fornecedor do sistema desde o início, pois caso a água esteja muito dura, será necessário um abrandador de água com resina.

Tabela 2. 6. Classificação da dureza da água pelo U.S. Geological Survey

Classificação	Faixa ($\text{mg.L}^{-1} \text{ CaCO}_3$)
Macia	0-60
Moderadamente Dura	61-120
Dura	121-180
Muito Dura	>180

Fonte: Black & Veatch Corporation (2010).

As resinas podem ser de diversos tipos:

- Resinas catiônicas ácidas fortes (SAC em inglês): removem os cátions trocando sódio ou próton.
- Resinas catiônicas ácidas fracas (WAC em inglês): removem os cátions associados aos bicarbonatos.
- Resinas aniônicas de base forte (SBA em inglês): removem todos os ânions. Eles são usados para remover carbonatos e silicatos.
- Resinas aniônicas de base fraca (WBA em inglês): removem ânions de ácidos fortes (sulfatos, nitratos e cloretos) com grande eficiência.

A maioria dos abrandadores de água convencionais operam com base no princípio da troca iônica¹¹. O sistema de troca iônica mais comumente usado é o trocador de íons de sódio. Os componentes do sistema abrandador incluem: dois tanques de resina, válvulas de controle e acessórios, conforme exigido pelo fabricante do sistema. A Figura 2.14 mostra um sistema

¹¹ A água dura passa através de um tanque com resina de poliestireno poroso carregada negativamente, que tende a atrair íons carregados positivamente para formar ligação de íons. As esferas de resina são carregadas com íons de sódio num banho saturado de NaCl (salmoura). Os íons de sódio com carga positiva, da solução de salmoura, permanecem acoplados à resina até serem expostos a outros íons carregados positivamente, que possuam uma carga de densidade mais alta, como Ca^{+2} e Mg^{+2} . As esferas de resina ligam-se preferencialmente as que têm íons de maior densidade. É assim que cátions univalentes como hidrogênio (H^+), potássio (K^+) e sódio (Na^+), que são originalmente carregados nas esferas de resina, podem ser trocados em cada superfície da resina por cátions bivalentes de maior densidade, como Ca^{+2} e Mg^{+2} , por sua vez, reduzindo a dureza da água.

abrandador duplo. Dependendo do tipo de resina, para regenerá-las geralmente é usado o sal comum, também o ácido clorídrico ou sulfúrico, e soda cáustica.



Figura 2. 14. Sistema abrandador de água duplo

Fonte: Black & Veatch Corporation (2010).

Quando usado o sal comum, uma vez que todos os íons de sódio na superfície da resina foram trocados por íons que causam dureza, o tanque ou leito de resina é considerado esgotado e deve ser regenerado. A regeneração geralmente leva cerca de 90 minutos e envolve uma retrolavagem, uma descarga concentrada de salmoura e um ciclo de enxágue.

A retrolavagem remove os sólidos acumulados e reduz a compactação da resina. A descarga de salmoura concentrada reabastece a carga de sódio nas esferas de resina. O ciclo de lavagem consiste em uma lavagem lenta e uma fase rápida. A lavagem lenta prolonga o tempo de contato resina-salmoura, enquanto a lavagem rápida remove qualquer solução de salmoura restante do fundo do tanque de resina. A regeneração pode ser realizada manualmente ou usando válvulas automáticas e sistemas de controle.

Recomenda-se, segundo Black & Veatch Corporation (2010), que o ciclo de regeneração seja baseado no tempo e não no volume, ou seja, a cada tantas horas e não depois de um certo número de Litros (gal) tratados. Outra forma de determinar quando regenerar o tanque de resina é medir a dureza da água tratada usando um analisador de dureza. Os analisadores de dureza também podem servir no sistema de controle, caso a dureza da água esteja acima do limite aceitável.

A regeneração pode ser por separado ou em linha (CARBOTECHNIA, 2020; GUY LE DALL, 1984). Por separado, a regeneração é feita em cada resina, o que significa que o regenerante passa primeiro pela resina forte, e o regenerante não consumido pela resina

forte é geralmente suficiente para regenerar a resina fraca sem dose adicional. As resinas catiônicas são regeneradas com um ácido forte, de preferência ácido clorídrico (HCl) ou sulfúrico (H₂SO₄). As resinas aniônicas são regeneradas com soda cáustica (NaOH). A regeneração em linha tem a mesma qualidade, mas como as resinas fracas se regeneram como consequência das resinas fortes, o consumo de regenerante é menor. Além disso, as resinas fracas funcionam melhor do que as resinas fortes, portanto, o volume total de resinas de troca iônica é reduzido.

Para o caso do sulfato, caso exista na água em quantidade superior à recomendada de 250 mg.L⁻¹ SO₄⁻² (VON HOYER, 1993), devem ser utilizadas resinas aniônicas de base fraca. A mesma é uma resina muito eficiente e requer menos NaOH para sua regeneração, de acordo com VERLEK (2020).

2) **Tanque de armazenamento-saturador de salmoura:** O sistema de saturação de salmoura consiste em um tanque de armazenamento, um conjunto de saturação de salmoura, um filtro coletor de poeira, um indicador de nível de sal e um indicador de nível de salmoura. Uma instalação típica de tanque de saturação é mostrada na Figura 2.15.

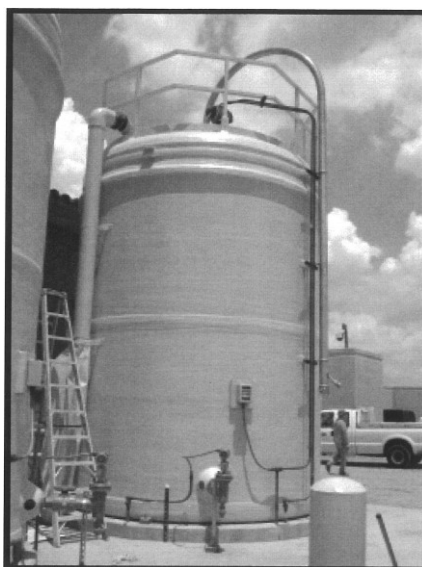


Figura 2. 15. Tanque saturador de salmoura

Fonte: Black & Veatch Corporation (2010).

Os tanques de saturação de salmoura em sistemas maiores de 45,36 kg.dia⁻¹ de cloro (>100 lb.dia⁻¹) geralmente são do tipo fechado e construídos em plástico reforçado com fibra de vidro (FRP). Tanques em sistemas menores que 45,36 kg.dia⁻¹ de cloro (<100 lb.dia⁻¹)

podem ser do tipo aberto e fabricados com polietileno de alta densidade (PEAD) (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

Os tanques de saturação de salmoura são dimensionados para armazenamento de 30 dias, com base no uso médio de cloro da planta e na taxa de vazão hidráulica. Recomenda-se que seja projetado com volume de armazenamento suficiente para manter um suprimento ininterrupto de salmoura. O lugar adequado para instalar é fora da planta (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

3) **Aquecedor de água mole:** Em alguns locais pode ser necessário um aquecedor de água mole para manter sua temperatura no nível adequado, geralmente acima de 10 °C (50°F).

Alguns sistemas de geração local são equipados com trocadores de calor para evitar que a diferença de temperatura entre a água mole e a temperatura de geração local exceda o limite recomendado pelo fabricante (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010). Em alguns casos, pode ser necessário a combinação de um trocador de calor e aquecimento elétrico suplementar. A capacidade do aquecedor de água pode ser determinada considerando a taxa de vazão de massa do sistema (M), a calor específico da água (C_p), e a diferença de temperatura (ΔT) entre a água disponível e a temperatura necessária na geração, usando a Equação 2.8.

$$\text{Capacidade Aquecedor} = M \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.8)$$

Um fator de segurança de 20% deve ser aplicado à capacidade necessária para compensar as perdas de calor. Para a estimativa de consumo de energia real do aquecedor, a eficiência de energia do aquecedor é incluída como um fator numérico no lado direito da Equação 2.8 (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

4) **Resfriador ou *chiller* de água mole:** Pode ser necessário um *chiller* de água mole quando a temperatura da água exceda a faixa aceitável. O *chiller* está à jusante do abrandador de água. A faixa de temperatura varia entre os fabricantes, mas uma temperatura acima de 26,7°C (80°F) pode ser prejudicial para as células eletrolíticas. De acordo com a lei de

Faraday¹², na Figura 2.16, a temperatura ideal para a eletrólise do cloreto de sódio é de 18,75°C (65,75°F).

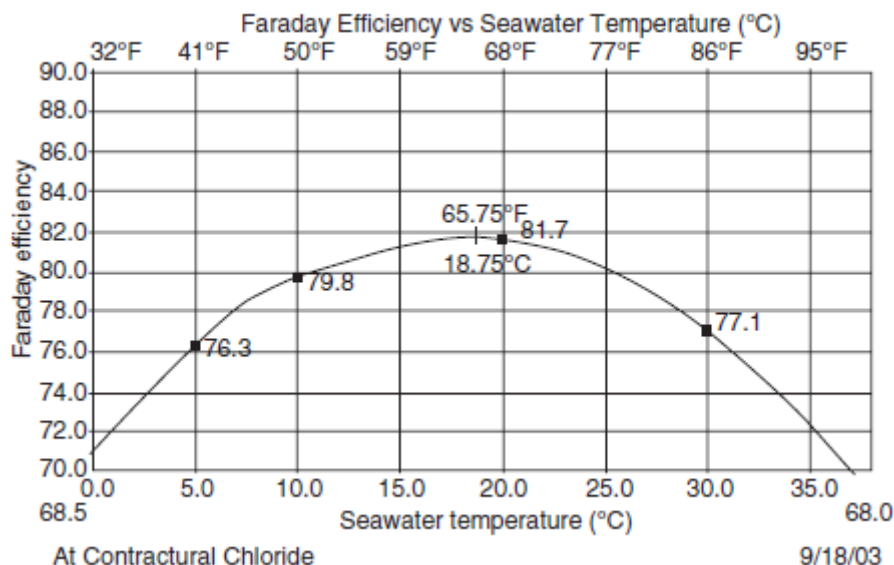


Figura 2. 16. Lei de Faraday para eletrólise

Fonte: Siemens Water Technologies (2003).

Os *chillers* podem ser resfriados a ar ou à água. As unidades refrigeradas a ar são tipicamente do tipo de estágio único e usam um refrigerante para extrair o calor, que é então rejeitado para o meio ambiente por meio de serpentinas do condensador acopladas aos ventiladores. Os *chillers* resfriados à água operam com o mesmo princípio, mas o calor é descarregado através de uma torre de resfriamento. Os *chillers* resfriados à água são mais eficientes do que as unidades resfriadas a ar, mas seu custo inicial é maior; portanto, eles geralmente são usados para atender a demandas de capacidade mais altas, onde a eficiência é um fator decisivo (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

Os sistemas de geração de NaClO local geralmente são servidos por *chillers* resfriados a ar. Seus principais componentes incluem um compressor de refrigerante, uma bomba de recirculação de água resfriada, uma bobina de refrigerante, um evaporador e bobinas e ventiladores do condensador.

A capacidade térmica do *chiller* pode ser determinada usando o mesmo princípio da Equação 2.8. Além disso, da mesma forma que para o aquecedor, um fator de segurança de 20% deve ser aplicado para contabilizar as perdas por transferência de calor no *chiller*; e a

¹² Lei de Faraday: a massa da substância depositada ou liberada em qualquer eletrodo é diretamente proporcional à quantidade de eletricidade ou carga passada.

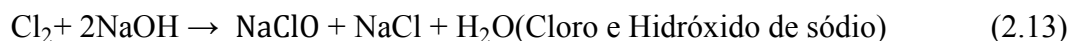
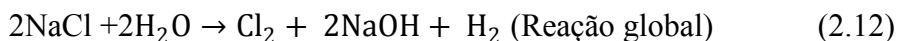
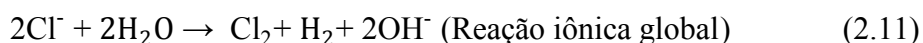
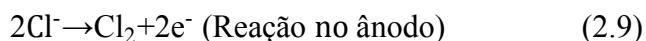
eficiência energética do *chiller* deve ser incluída como um fator numérico no lado direito da Equação 2.8.

5) **Medidor/dosador de salmoura:** A solução de salmoura pode ser transportada para as células geradoras usando um sistema do tipo edutor¹³ ou pelas bombas dosadoras tradicionais. A concentração ideal de NaCl para eletrólise é de 2,5% a 3% em massa. Para que esta concentração seja atingida, 26,4% em massa de solução de salmoura saturada é diluída na pilha das células eletrolíticas (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

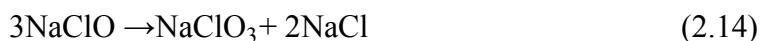
A solução concentrada é transportada por bombas dosadoras para a pilha de células eletrolíticas, sendo depois movida pela água de diluição através das células eletrolíticas e pelas tubulações para os tanques de armazenamento.

Os filtros no lado de sucção das bombas dosadoras de salmoura devem ser dimensionados para capturar todos os resíduos e NaCl não dissolvidos do leito do tanque saturador para impedir que eles conectem a sucção às bombas dosadoras (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

6) **Eletrolisador:** A célula eletrolítica é o principal componente do sistema de geração de NaClO local. É um reator de fluxo contínuo, estacionário, onde NaClO é produzido de acordo com as seguintes reações apresentadas nas Equações 2.9 à Equação 2.13.



A reação de dissociação do NaClO é expressa pela Equação 2.14.



¹³ Edutor: Os edutores são bombas de jato de líquido que aspiram outro líquido ou lama, misturam ou bombeiam contra gravidade ou contrapressão.

A Figura 2.17, mostra o esquema de funcionamento de uma célula eletrolítica, onde ocorrem as reações mencionadas.

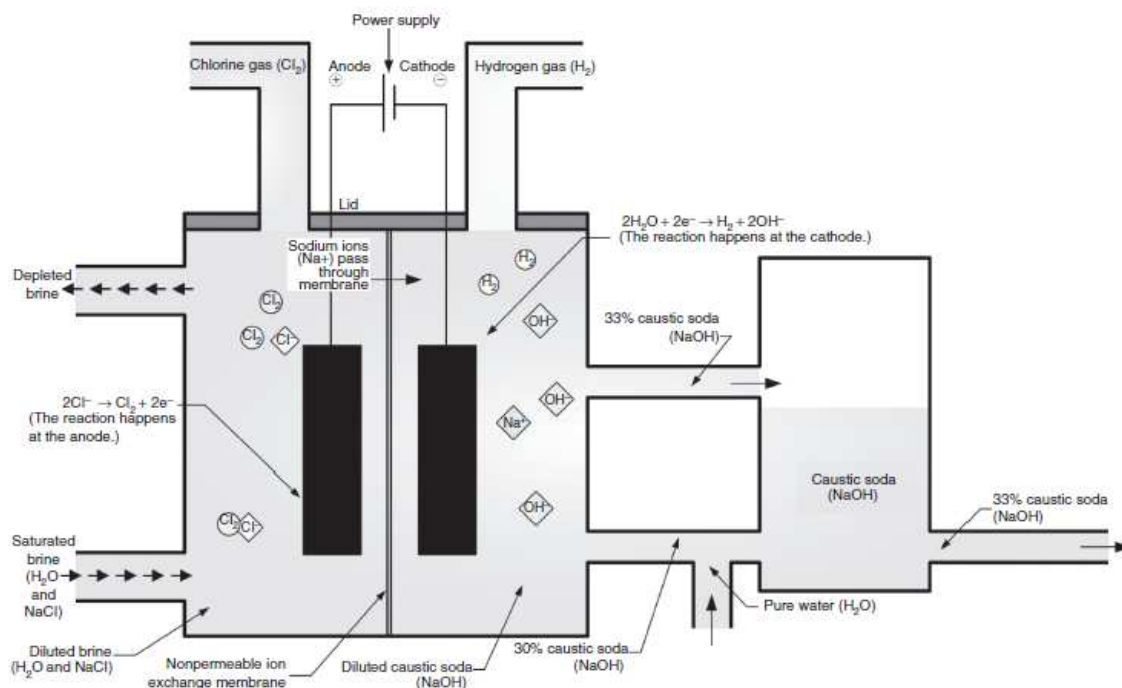


Figura 2. 17. Esquema de célula eletrolítica

Fonte: BLACK & VEATCH CORPORATION (2010).

Uma vez em solução, o NaCl se dissocia em íons livres de Na^+ e Cl^- . Os íons Cl^- são oxidados no ânodo para formar gás Cl_2 , enquanto as moléculas de água¹⁴ são reduzidas no cátodo para formar ânions hidroxila (OH^-) e gás H_2 . Os Na^+ e OH^- se combinam para formar hidróxido de sódio (NaOH), que por sua vez reage com o gás Cl_2 para produzir a solução desejada de NaClO. Como mostra a Figura 2.17, uma reação de dissociação, na Equação 2.14, forma um subproduto de clorato de sódio que pode contribuir para a ineficiência celular e tem o potencial de consumir hipoclorito e ácido hipocloroso intermediários, antes da formação do NaClO. Tanto a temperatura da entrada de salmoura quanto a concentração da entrada de sal podem afetar a formação de subprodutos. Portanto, essas duas variáveis são monitoradas de perto e controladas pelo sistema de geração no local.

A capacidade dos geradores varia de 2,72 a 1360,8 kg.dia⁻¹ (6 a 3000 l.dia⁻¹) de cloro disponível e vários geradores podem ser usados para atender a demandas maiores de cloro. Os sistemas geradores geralmente são compostos por várias células eletrolíticas, chamadas

¹⁴ A água entra diretamente no eletrolisador, sendo o vapor gerado a partir do consumo de eletricidade.

módulos, com capacidades de 2,72 a 22,68 kg.dia⁻¹ (6 a 50 lb.dia⁻¹). Estão disponíveis sistemas de módulo único e múltiplos. A maioria dos sistemas de módulos múltiplos é composta por unidades empilhadas verticalmente, porém, alguns podem ser empilhados horizontalmente (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

Cada célula eletrolítica consiste em compartimentos de placas de eletrodo (cátodo e ânodo) montados verticalmente para formar uma matriz de eletrodos que serve para o fluxo da solução de salmoura diluída. À medida que a solução de salmoura flui entre as placas dos eletrodos e é eletrolisada, sua concentração diminui, a concentração de NaClO aumenta e o gás H₂ é formado.

A configuração do banco paralelo facilita a purga de H₂ e minimiza as inscrustações. O número de pares de placas de eletrodos nos compartimentos das células pode ser ajustado de acordo com a capacidade da unidade desejada (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

Os principais componentes da pilha de células geradoras (eletrolisador) incluem: uma câmara cilíndrica de retenção de eletrodo de acrílico ou cloreto de polivinila (PVC), placas de eletrodo, saída de gás H₂, trocador de calor e diluição em salmoura. A Figura 2.18 mostra uma instalação de um eletrolisador com múltiplas pilhas de células eletrolíticas.



Figura 2. 18. Eletrolisador com múltiplas pilhas de células eletrolíticas

Fonte: Siemens Water Technologies (2003).

As células eletrolíticas são câmaras cilíndricas de acrílico transparente, com flanges nas extremidades aparafusadas. Todos os componentes das células são unidos por soldagem ou

compressão mecânica. As placas dos eletrodos são construídas em titânio. As placas do ânodo são do tipo eletrodo dimensionalmente estável, revestidas com um óxido de metal precioso para minimizar a deterioração. Conforme a corrente é aplicada a cada nó dos eletrodos, um potencial de corrente contínua (CC) constante é mantido em suas placas de células. Os eletrodos têm um requisito máximo de corrente alternada (CA) de $4,4 \text{ kW.kg}^{-1}$ de Cl_2 na saída ($2,0 \text{ kW.lb}^{-1}$) e uma densidade de corrente máxima de $0,47 \text{ A.cm}^{-1}$ ($1,2 \text{ A.pol}^{-1}$). Os requisitos de energia variam entre os fabricantes. As células eletrolíticas construídas para este serviço são sem membrana, o que reduz o potencial de incrustações e devem ser testadas na fábrica para uma pressão de pelo menos 344.738 N.m^{-2} (50 psi) (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

As placas de eletrodo são monopolares ou bipolares. As placas monopolares são separadas dentro da célula em placas de ânodo e placas de cátodo, o que permite a substituição por separado quando deteriorado. As placas bipolares contêm o ânodo e o cátodo juntos, portanto toda a placa deve ser substituída. A pilha do gerador é pré-montada na fábrica e montada numa estrutura de aço resistente à corrosão e revestida com epóxi. Todos os principais componentes do sistema, incluindo acessórios de diluição de salmoura e o trocador de calor de água mole, são pré-instalados e montados na fábrica (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

O gás H_2 também está presente na forma de bolhas e dissolvido na solução de NaClO . O H_2 não pode se separar da solução até que o NaClO saia da célula e o H_2 possa se difundir no ar. O gás H_2 adicional é diluído no tubo vertical e nos tanques de armazenamento (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

A limpeza de incrustações das células é feita com uma solução fraca de ácido e as placas de ânodo são revestidas com um óxido de metal precioso para reduzir sua taxa de degradação. As células são sensíveis aos raios ultravioletas, portanto, devem ser instaladas dentro da planta a uma temperatura entre $7,2^\circ\text{C}$ (45°F) e $37,8^\circ\text{C}$ (100°F) (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

7) **Diluição de salmoura:** Os principais componentes são as tubulações, válvulas, rotâmetro¹⁵ para solução de salmoura, rotâmetro para água mole, transdutor de pressão, manômetro, sensores e chaves de vazão. Os geradores de pequena capacidade também podem incluir um edutor. A célula eletrolítica precisa de pelo menos 344.738 N.m^{-2} de pressão da

¹⁵O rotâmetro é um tubo de vidro ou acrílico com um flutuador para indicação do fluxo. Possui capacidade para medir a solução de salmoura e os fluxos de água mole.

água na válvula solenóide da tomada de água na pilha. Se não houver pressão adequada, deve-se utilizar uma bomba de reforço.

8) **Retificador:** converte a corrente CA fornecida pela rede elétrica em corrente CC usada para eletrólise. Cada conjunto de pilhas possui um tamanho de retificador dedicado para produzir CC para o gerador associado. O retificador é projetado com um fator de potência de pelo menos 90%. Aliás, as unidades retificadoras geram uma quantidade substancial de calor, que deve ser considerado no projeto do sistema de climatização (HVAC¹⁶) (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

9) **Formador-separador de H₂:** A eletrólise gera gás H₂ que sobe para o topo da célula eletrolítica, onde parte dela é ventilada e o restante sai da célula com a solução final de 0,8% em massa de NaClO.

O H₂ é motivo de preocupação devido ao seu LEL. Abaixo do LEL, a concentração do gás no ar não é suficiente para inflamar. Acima do limite superior de explosão, o gás desloca o ar e não tem suficiente oxigênio disponível para a ignição. O LEL para H₂ no ar é de 4% em volume. Como medida de segurança, os sistemas são projetados para manter a concentração de H₂ no ar abaixo de 25% do LEL, ou 1% em volume (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

10) **Soprador/diluidor de H₂:** A ventilação forçada do ar para a diluição do gás H₂ é fornecida por sopradores mecânicos, que funcionam durante a operação do sistema de geração e no mínimo 10 minutos após a parada dos geradores. Um sistema de sopradores múltiplos é composto por sopradores mecânicos, tubulações de soprador, silenciadores de entrada, filtros de entrada, caixas acústicas, válvulas de retenção e pressostatos diferenciais.

O soprador de diluição é dimensionado considerando a capacidade total de células geradoras e a necessidade de manter a concentração de H₂ abaixo de 25% do LEL, como já mencionado. O soprador de tubo vertical é normalmente dimensionado para fornecer 1,7 m³.h⁻¹ de ar diluído por cada 0,45 kg de capacidade de cloro (ou 1 scfm¹⁷ por lb de cloro). A taxa de diluição nos tanques de armazenamento é de 0,85 m³.h⁻¹ por 0,45 kg de capacidade disponível de cloro (0,5 scfm de ar por lb de cloro). Se uma tubulação não for fornecida, os

¹⁶ Do inglês Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC), corresponde a Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, que são as funções básicas e primordiais dos sistemas de climatização.

¹⁷ scfm: pés cúbicos por minuto padrão, em inglês.

sopradadores do tanque de armazenamento são dimensionados para fornecer $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de ar por cada 0,45 kg de capacidade de cloro (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

Para a estimativa da eficiência elétrica do ventilador, inicialmente deve-se estimar a velocidade do ar, que é determinada pela vazão volumétrica geral necessária e pela área de seção transversal da tubulação de descarga, como mostra a Equação 2.15.

$$V_{\text{ar}} = Q_{\text{ar}} / OA \quad (2.15)$$

Onde:

V_{ar} : velocidade do ar;

Q_{ar} : taxa de vazão volumétrica do ar;

OA : área da seção transversal do tubo de descarga.

Para calcular a potência (em HP), a pressão total deve ser determinada. A pressão total (TP) é a soma da pressão da velocidade e da pressão estática. A pressão estática é uma função dependente do material e forma do duto, enquanto a pressão da velocidade é calculada usando a Equação 2.16.

$$VP = (V_{\text{ar}} / 4005)^2 \quad (2.16)$$

Onde:

VP : pressão de velocidade, em polegadas por coluna de água. Somando-se com a pressão estática, obtém-se a TP.

A potência é calculada utilizando a Equação 2.17.

$$AHP = (Q_{\text{ar}} \times TP) / 6356 \quad (2.17)$$

Onde:

AHP : potência do ar (HP);

TP : pressão total (polegadas de coluna de água).

A eficiência mecânica (ME) é calculada pela razão da potência do ar (AHP) e da potência nominal de ruptura do ventilador (BHP), como mostra a Equação 2.18.

$$ME = AHP/BHP \quad (2.18)$$

Para uma entrada de motor conhecida, a eficiência elétrica também pode ser calculada como mostrado na Equação 2.19.

$$EE = (0,746 \times BHP)/kW \quad (2.19)$$

Onde:

EE: eficiência elétrica;

kW: potência de entrada do motor.

A eficiência total do ventilador pode ser obtida multiplicando a eficiência mecânica e elétrica, como mostra a Equação 2.20, ou também coma Equação 2.21.

$$TE = ME \times EE \quad (2.20)$$

$$TE = (Q_{ar} \times TP)/(6356 \times BHP) \quad (2.21)$$

Onde:

TE: a eficiência total.

11) **Tanque de armazenamento de NaClO**: A solução de NaClO é armazenada em tanques de FRP. A duração do armazenamento de NaClO diluído no local varia de acordo com a demanda, mas é típico fornecer 3 dias de armazenamento com dosagens e vazões médias, ou 1 dia com dosagem e vazão máximas.

Os tanques de armazenamento podem estar localizados ao ar livre, exceto em áreas de clima muito frio. Os tanques de armazenamento de NaClO não são projetados para serem pressurizados. Portanto, os sopradores de diluição de H₂ devem ser do tipo de baixa pressão e a ventilação do tanque deve ser dimensionada adequadamente (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

12) **Equipamento de alimentação de NaClO**: A solução de NaClO é entregue ao processo de tratamento por bombas dosadoras que podem ser do tipo diafragma ou peristáltico. É comum usar a solução completa fornecida (concentração de 12% a 15% em massa) para fazer a realimentação do sistema de geração local. Portanto, as bombas dosadoras

são dimensionadas para fornecer também em 0,8% em massa de NaClO (BLACK & VEATCH CORPORATION, 2010).

A partir do detalhamento do processo de produção de NaClO, da proposta de instalação de uma planta em uma região isolada ou conectada à rede elétrica paraguaia e da sustentabilidade e disponibilidade dos recursos elétricos atual e futuro para viabilizar tal instalação, a seguir apresenta-se a pesquisa bibliográfica sobre a oferta de energia elétrica do Paraguai.

2.4. Oferta de Energia Elétrica Existente e Prevista

O Paraguai atualmente tem três usinas hidrelétricas (UHEs) em funcionamento, conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), as quais juntas garantem a totalidade da oferta bruta de energia elétrica. A UHE Binacional Itaipú conta com 14.000 MW de potência nominal, sendo 50% desta potência correspondente ao Paraguai e o restante ao Brasil. A UHE Binacional Yacyretã, possui 3.200 MW instalados, sendo 1.600 MW correspondentes ao Paraguai e o restante à Argentina. E por fim, a UHE de Acaray, de 210 MW, é integralmente paraguaia e pertence à concessionária *Administración Nacional de Electricidad* (ANDE) (VMME, 2017).

Além dessas fontes de energia hidrelétrica, de acordo com o Plano Mestre 2016-2025 da ANDE, na sua Resolução RP N° 37590 de 2016, as obras de geração de novas UHEs de pequeno porte (ou seja, pequenas centrais hidrelétricas - PCHs) totalizam 502,9 MW de capacidade nominal e 286,2 MW médio de potência, distribuídos em 28 projetos previstos para entrar em operação até dezembro de 2025. Esses projetos são distribuídos em PCHs no Sistema Central, Sistema Sul, Sistema Leste e Sistema Norte, abarcando diversos departamentos do país (ANDE, 2016).

Entre estes projetos, a repotenciação da UHE Acaray, nos grupos geradores 1 e 2, também é considerada, com duas turbinas do tipo Francis de 37,5 MW cada uma e potência média de 35 MW. Para esse projeto, o prazo de entrada de operação é dezembro de 2024 (ANDE, 2016). Além disso, considera-se a construção de uma PCH de $49,26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de caudal turbinado, com duas turbinas Francis de 6 MW e potência média de 7,58 MW. A PCH estará interconectada ao SIN em 66 kV, terá uma estação de 13,8/66 kV, de 48 km até a subestação de Minga Porã, e prazo de entrada em operação em dezembro de 2024 (ANDE, 2016).

No plano de expansão inclui-se a instalação de turbinas na represa do Yguazu, sendo quatro turbinas Francis de 25 MW cada uma e potência média de 20,89 MW. Com conexão ao SIN em 220 kV, estação de 13,8/220 kV, está prevista para entrar em operação em dezembro de 2025. A represa de Yguazu é um reservatório de água que pode suprir as necessidades da UHE de Acaray (ANDE, 2016).

Também se considera o projeto do braço Aña Cuá, uma extensão da represa da Ilha Yacyretã, pertencente à UHE de Yacyretã. Para tanto, prevê-se a inclusão de três turbinas do tipo Kaplan de eixo vertical de 90,2 MW cada uma, totalizando 270 MW de capacidade de produção e 2.000 GWh de energia estimada por ano, aproximadamente 10% a mais para a UHE de Yacyretã (EBY, 2018).

Por fim, existem também os projetos de duas UHEs, a saber Corpus Christi (2880 MW) e Itati-Itacorá (2000 MW), mas ainda em estudo de acordo com a Comissão Mista do Rio Paraná (COMIP)¹⁸ (COMIP, 2018) e (COMIP, 2017).

Quanto a outras formas de energia renovável, existem projetos de sistemas solares fotovoltaicos (SFVs) interconectados ao SIN no Sistema Oeste (Departamento de Boquerón, Alto Paraguay, e norte do Presidente Hayes). São 5 projetos previstos de SFVs sendo: 4 projetos de parques híbridos solares-diesel em Bahia Negra-Toro Pampa, de 500 kWp com geradores diesel de 1.100 kVA cada um, interconectados ao SIN em 23 kV; e um projeto de 10 MWp em Loma Plata, com painéis de dois graus de liberdade, interconectado ao SIN em 220 kV, com previsão de entrada em operação até dezembro de 2025 (ANDE, 2016). No total serão 33 projetos previstos pela ANDE no Plano Mestre de 2016-2025.

Atualmente existem dois projetos implementados de segurança energética com SFVs, desenvolvidos em destacamentos militares no Chaco paraguaio pelo Parque Tecnológico Itaipú (PTI) para fornecimento de eletricidade. Uma planta de 40 kWp e 160 painéis encontra-se em Mayor Pablo Lagerenza (775 km de Assunção) e outra, de 40 kWp, em Capitán Joel Estigarribia (620 km de Assunção). Ambos sistemas estão instalados de forma isolada, acoplados num sistema de geração híbrido solar-diesel para fornecimento contínuo de energia elétrica (PTI, 2019; ITAIPU, 2019).

De forma paralela aos estudos apresentados, existe um estudo da Itaipu, com colaboração da Fundação Bariloche (ITAIPU, 2016), da Perspectiva Energética do Paraguai no período 2013-2040, no qual compara-se o cenário base sem modificações e o cenário de

¹⁸A COMIP é formada por delegados do Paraguai e Argentina, com o objetivo de administrar as possibilidades técnicas e econômicas de aproveitar os recursos do rio Paraná e garantir sua sustentabilidade e preservação (COMIP, 2018).

demanda alternativa. Neste cenário alternativo existe a necessidade de incorporar novas fontes de energia para continuar com uma margem de reserva (excedente de geração) em níveis acima de 40%, dando confiabilidade ao sistema, e propõe-se a entrada gradual das PCHs entre 2018 e 2027, com capacidade total de 1.006 MW.

Neste caso, na usina de Acaray haverá uma expansão em duas etapas, de 75 MW cada, em 2030 e 2031; e no braço Aña Cua nos mesmos anos, entrando em operação 135 MW em cada ano. Além disso, até 2032 é proposta a entrada de uma turbina a gás de ciclo aberto de 100 MW. A partir de 2035, espera-se a entrada gradual da UHE Corpus Christi com a incorporação de 240 MW de energia por 6 anos até 2040. Também é considerada a entrada de outra turbina a gás natural, de 100 MW no ano 2035, e uma usina de ciclo combinado a gás natural, de 500 MW em 2036 (ITAIPU, 2016).

Estima-se que, nesse cenário, seja possível avançar nos processos de integração regional, diminuindo as perdas técnicas de transmissão e distribuição (T&D) para 11,8% em 2023 (de acordo com o Plano da ANDE) e depois gradualmente para 10% em 2040. Dentro desse contexto, considerando as projeções de consumo de energia por setores e as medidas de gestão de energia, o fator de carga aumentará de 59% em 2013 para 72,5% em 2040.

A Figura 2.19 mostra a proposta de expansão da geração até 2040 segundo Itaipu (2016). A linha vermelha mostra a tendência de crescimento mantendo a margem de reserva em 40%.

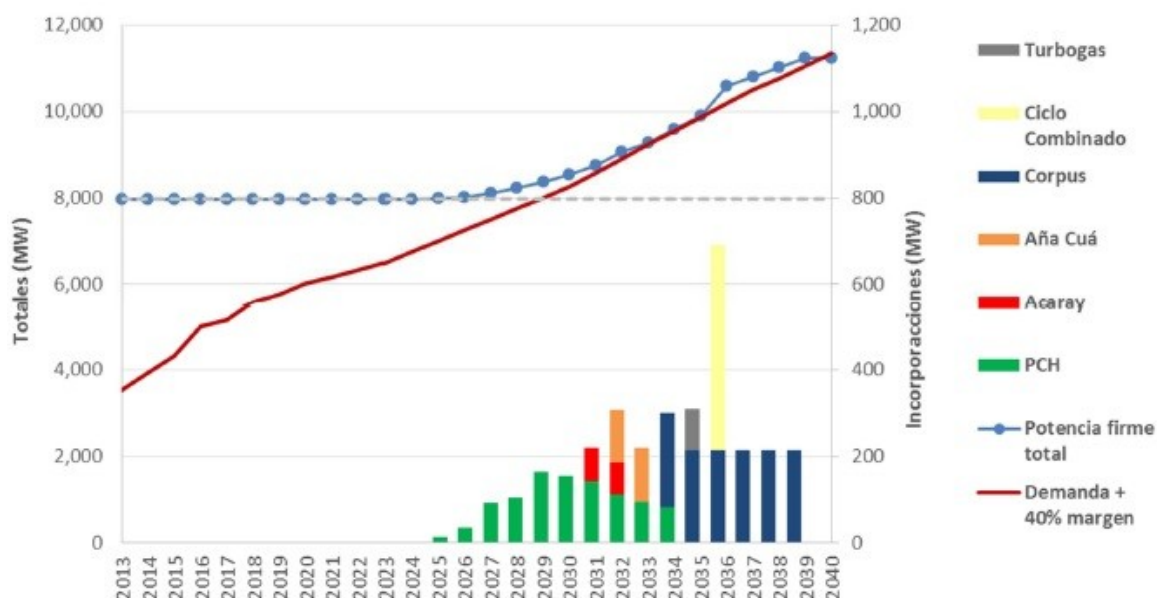


Figura 2. 19. Perspectiva energética do Paraguai 2040

Fonte: ITAIPU (2016).

Destaca-se que no Chaco central, a ANDE fornece eletricidade à Cooperativa dos Menonitas na Estação de Loma Plata, que se encarrega da distribuição e comercialização da eletricidade para o consumo na localidade. O convênio entre a ANDE e a Cooperativa tem vigência até 2021, porém utiliza-se o mesmo tarifário da ANDE para a comercialização da eletricidade.

No caso do atendimento da demanda elétrica de uma planta de NaClO instalada no Chaco paraguaio, provavelmente de forma isolada do sistema de distribuição de energia elétrica, além do potencial solar fotovoltaico é possível também incluir o potencial de utilização do H₂ produzido como vetor energético. A seguir apresenta-se o detalhamento desta rota tecnológica, que corresponde ao foco da tese.

2.5. Produção e Uso Energético de H₂

O H₂ é um gás que, em condições normais, é incolor, inodoro e insípido, composto por moléculas diatômicas. O H₂ é usado na síntese de amônia, em operações de refino de petróleo, como craqueamento e no tratamento para remover o enxofre, assim como na hidrogenação catalítica de óleos vegetais líquidos insaturados para obter gorduras sólidas. Pode ser produzido de diversas formas, tanto a partir de fontes fósseis quanto de fontes renováveis de energia (ZHANG E OUTROS, 2014), como pode-se verificar na Tabela 2.7.

2.5.1. Sistemas de armazenamento de H₂

Existem atualmente diversas formas de armazenar o H₂ produzido para fins energéticos, entre os quais pode-se citar: o armazenamento de forma livre, em materiais a base de carbono, em microesferas de vidro, em zeólitas e em complexos hidretáveis.

De forma livre, o H₂ pode ser armazenado no estado gasoso ou no estado líquido. No estado gasoso podem ser usados tanques cilíndricos de alta pressão (de 35 a 70 Mpa), volumes de 32 a 150 litros (ou 29 a 65 kg de gás) à temperatura ambiente (IRANI, 2002). Os materiais empregados nos tanques são fibra de carbono, compósito ou resina epóxica, alumínio, entre outros. A desvantagem desta forma de armazenamento é a baixa densidade de energia do H₂ e o volume armazenado, mesmo a 69 MPa (10.000 psi) representa perto de um fator de 1/8 comparado à gasolina (ZUTTEL, 2004).

Tabela 2. 7. Formas de produção de H₂

Forma de produção	Característica	Fonte
Reforma de Gás Natural	Existem 3 rotas de reforma: reforma a vapor, oxidação parcial e reforma autotérmica. A reforma do gás envolve 4 etapas: dessulfuração do gás, reforma a alta temperatura (800- 900 °C), reação de enxágue de água-gás para reduzir o CO, e purificação do H ₂ separando-o do CO ₂ , mediante adsorção de balanço de pressão.	REN (2017). AMIN (2011).
Reforma de Metanol e Etanol	A reforma de etanol e metanol é uma reação fortemente endotérmica; requerendo energia térmica para gerar H ₂ . O maior desafio no processo é minimizar a energia térmica, exigindo provisões de grandes quantidades de calor para manter o processo a uma temperatura constante de reação. Para maximizar a produção é fundamental garantir o suprimento suficiente de vapor e minimizar a desidratação e decomposição do etanol.	GHASEMZADEH (2020).
Reforma de Glicerol	O glicerol é um subproduto do biodiesel que pode ser aproveitado na produção de H ₂ . A purificação do glicerol ainda é o principal obstáculo. As melhores condições para produzir H ₂ estão a uma temperatura > 627°C, pressão atmosférica e uma razão molar de água / glicerol de 9:1. Sob essas condições, a produção de metano é minimizada e a formação de carbono é inibida termodinamicamente.	AVASTHI (2013). CHEN (2011). ADHIKARI (2009).
Craqueamento de Amônia e de Metano	Semelhante ao H ₂ , a amônia como vetor é livre de carbono nos usos finais, embora a emissão de CO ₂ na produção de amônia dependa da fonte de energia. O craqueamento catalítico do metano produz H ₂ livre de CO, o mesmo não inclui o enxágue do gás metano com água, e a energia demandada é menor que por reforma a vapor, por mol de metano decomposto.	LAN (2012). AMIN (2011).
Eletrólise da Água	Processo livre de carbono, onde por meio do processo de eletrólise, a molécula de água que é o reagente, é dissociada em H ₂ e oxigênio sob a influência da eletricidade.	KUMAR (2019).

Na forma líquida, o H₂ é armazenado em tanques criogênicos a aproximadamente 253°C, 40 kg em 90 litros, 70,8 kg.m⁻³ (ZUTTEL, 2004). Cerca de 30% a 40% da demanda energética do processo é utilizada para liquefação. Um gel de H₂ líquido obtém-se pela mistura do gás liquefeito com outros combustíveis, como metano e etano congelado. As vantagens deste tipo de armazenamento são: segurança, redução de perdas por evaporação e alta densidade de combustível. A desvantagem é que, mesmo com densidade de energia por volume maior que no estado gasoso, precisa-se de baixa temperatura (20 K) para tal (SØRENSEN, 2018).

O H₂ pode ser adsorvido em materiais carbonosos como hidrocarbonetos (sólidos, líquidos ou gasosos), fulerenos, nanotubos, fibra de carbono ou carbono ativo. A densidade em volume alcançada é de 20 kg.m⁻³ (STRÖBEL et al., 2006).

O armazenamento em vidro é realizado na forma de microesferas, necessitando-se de pressões de 35 a 70 MPa, a 300°C (KOHLI, D. K. et al., 2008). Posteriormente, há um resfriamento à temperatura ambiente e transferência a tanques de baixa pressão.

Já para o armazenamento em zeólitas, utiliza-se geralmente complexos alumínio-silicato, a 300°C e 10MPa. Também se utilizam estruturas microporosas metal-orgânicos, tipicamente estruturas ZnO com anéis de benzeno e outros isômeros (WEITKAMP. J. et al. 1995).

O armazenamento também pode ser feito em ligas e complexos hidretáveis e a Tabela 2.8 apresenta uma lista dos principais hidretos metálicos empregados, com suas respectivas características. Da Silva (1993) mostrou um protótipo de armazenamento com material FeTi a 10 MPa e 250 °C. As vantagens desta forma de armazenamento são: segurança, sistema compacto e reversível (VIELSTICH. W. et al, 2003).

Tabela 2. 8. Materiais empregados para armazenamento de H₂ nas formas de hidretos metálicos, complexos e borohidretos

Hidreto metálico	Densidade gravimétrica teórica do material (% H ₂)	Pressão de dissociação (MPa)	Temperatura de dissociação
MgH ₂	7,6	0,5	290
Mg ₂ NiH ₄	3,6	0,4	250
FeTiH _{1,7}	1,8	0,15	27
LaNi ₅ H ₆	1,4	0,2	27
Hidretos complexos			
LiAlH ₄	10,6		190
NaAlH ₄	7,5		100
Mg(AlH ₄)	9,3		140
Ca(AlH ₄)	7,8		>230
Borohidreto			
LiBH ₄	18,5		300
NaBH ₄	10,6		350
Mg(BH ₄)	14,9		320

Fonte: Adaptado de LINARDI (2010).

2.5.2. Utilização em células a combustível (CaC)

Uma vez gerado e armazenado, o H₂ pode ser convertido em energia elétrica por meio de uma CaC. As CaC são sistemas eletroquímicos capazes de transformar a energia química

de um combustível diretamente em energia elétrica e calor, sempre que tenha uma alimentação externa constante de um combustível. A conversão ocorre por meio de duas semi-reações eletroquímicas em dois eletrodos, separados por um eletrólito apropriado, ou seja, a oxidação de um combustível no ânodo e a redução de um oxidante no cátodo. Por exemplo, o combustível H_2 e o oxidante oxigênio, tem a denominação de célula ácida, que formam água e produzem calor, além da liberação de elétrons. As Equações 2.22 e 2.23 mostram os processos que ocorrem no cátodo e no ânodo. Na Tabela 2.9 são descritos os componentes de uma célula unitária.

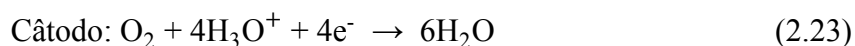
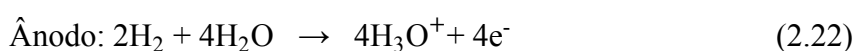


Tabela 2. 9. Componentes de uma CaC

Componente	Descrição
Ânodo	Eletrodo combustível, onde ocorre a oxidação do combustível. Fornece a interface entre o combustível e o eletrólito, catalisa a reação de oxidação e conduz os elétrons para o circuito externo.
Cátodo	Eletrodo oxidante, onde ocorre redução do oxidante. Fornece a interface entre o oxigênio e o eletrólito, catalisa a reação de redução e conduz os elétrons até o sítio reativo.
Eletrólito	Transporta as espécies iônicas envolvidas nas reações entre os eletrodos, previne a condução de curto circuito e separa os gases dos eletrodos, mesmo a pressões elevadas. Geralmente, o eletrólito dá o nome ao tipo de CaC.
Camada difusora	Sem catalisador, vem sempre associada aos eletrodos, ânodo e cátodo. Tem função de distribuição dos gases reagentes na camada catalítica e o contato elétrico do eletrodo com a placa bipolar. A camada difusora é conhecida também como GDL (<i>gas diffusion layer</i>).

No caso de módulos, incluem-se também as placas bipolares ou interconectoras, sistemas de processamento de combustível (no caso da reforma), vedações, trocadores de calor e inversor.

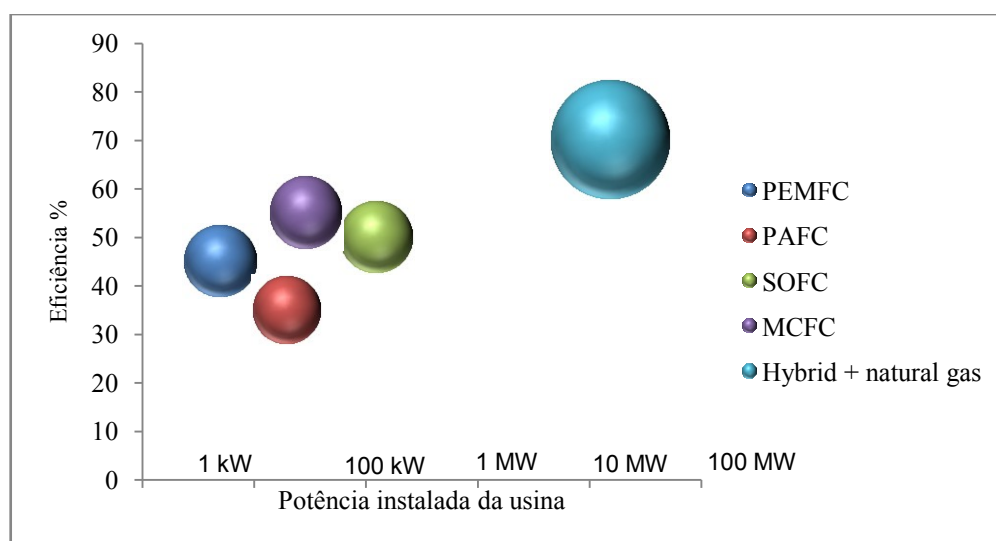
Por outro lado, os eletrodos de difusão gasosa (EDG) são camadas de alta porosidade, cuja espessura depende do tipo de célula (20 μm até 0,01 mm). Tem como objetivo fornecer uma grande zona reativa com o mínimo de resistência a facilitar o acesso de reagentes (H_2 ou syngás e oxigênio) e a retirada de produtos (gás e água). Geralmente dividem-se em duas camadas, como mostra a Tabela 2.10.

Tabela 2. 10. Camadas de eletrodos de difusão gasosa

Camada	Descrição
1) Camada difusora (CD)	Hidrofóbica, do lado do gás, distribui o gás reagente, remove os produtos e conecta eletricamente a camada catalítica ao circuito externo
2) Camada catalítica (CL)	Hidrofílica, em contato com o eletrólito, promove eficientemente a reação eletroquímica.

Fonte: Linardi (2010).

Existem diversos tipos de CaC e a seleção da mais adequada depende de diversos fatores assim como dos usos. Uma classificação é feita segundo o eletrólito que utiliza e a temperatura de operação: AFC (*alkaline fuel cell*); PEMFC (*proton exchange membrane fuel cell*); DMFC (*direct methanol fuel cell*); PAFC (*phosphoric acid fuel cell*); MCFC (*molten carbonate fuel cell*) e SOFC (*solid oxide fuel cell*). Na Figura 2.20 mostra-se a relação entre eficiência das células e a capacidade instalada de uma planta, para cada tipo de CaC, sendo a híbrida a de maior tamanho e eficiência.

**Figura 2. 20.** Eficiências de CaC para diversas potências

Fonte: Adaptado de Linardi (2010).

As AFC baseiam-se na utilização do KOH ou NaOH como eletrólito alcalino, em concentrações de 3% a 45%. O íon trocado é OH^- . Este tipo de célula foi a primeira desenvolvida no mundo e pertence à classe de baixa temperatura, entre 60 a 90°C, com pressões que variam de 1 a 4 atm. Pode utilizar como combustível líquido a hidrazina (N_2H_4) ou amônia (NH_3), devido ao carácter alcalino do meio reativo (LINARDI, 2010). Entretanto, na eletrólise alcalina, existem aspectos negativos, como densidades de corrente limitadas

(abaixo de 400 mA.cm^{-2}), baixa pressão de operação e baixa eficiência energética (KUMAR, 2019). Sua eficiência está na ordem de 70%.

As PEMFC baseiam-se na membrana do tipo nafion, ou semelhante, condutora de prótons, quanto úmida, como eletrólito. A impregnação das partículas de negro-de-fumo dos EDG com solução de nafion reduz a carga de platina necessária para o mesmo desempenho, em torno de $0,3\text{-}0,5 \text{ mgPt.cm}^{-2}$ de eletrodo. Também se classifica como de baixa temperatura (60 a 90°C), tem aplicações portáteis, apresenta uma eficiência do sistema da ordem de 50%, maior densidade de potência, menor relação massa/volume, entre outras características (BARBIR, 2005; RAISTRICK, 1989).

A DMFC possui a mesma construção de uma PEMFC, com os mesmos componentes, mas o combustível é o metanol que sofre oxidação anódica direta. O metanol pode ser alimentado na forma líquida ou vaporizado, diluído com água ou nitrogênio (N_2). Nessa célula ocorre a adsorção dissociativa do metanol, que é a adsorção do metanol na superfície do eletrolisador, seguida de sucessivas desidrogenações do metanol, com formação de H_2 e monóxido de carbono (CO), absorvidos na superfície do eletrolisador. Pertence à classe de células de baixa temperatura, com aplicações portáteis e eficiências elétricas entre 40% e 50%. As densidades de potência neste tipo são da ordem de 350 mW.cm^{-2} , segundo Linardi (2010). As DMFCs mostram grandes potenciais em aplicações de dispositivos portáteis, automóveis e usinas estacionárias pela facilidade do manuseio de combustível líquido (XIA et al., 2019).

Para a oxidação de outras moléculas de álcoois, por exemplo a célula a etanol direto (DEFC), densidades de corrente menores são obtidas, da ordem de 100 mW.cm^{-2} , devido a uma barreira energética extra para oxidação desta molécula, representada pela quebra da ligação C-C. Uma vantagem da DEFC é a possibilidade de utilização de um combustível na forma líquida. Entretanto, o metanol como combustível em sistemas de CaC apresenta muitas desvantagens, como o envenenamento do catalisador por CO , com sua toxicidade. Outro problema é a grande permeabilidade da membrana nafion ao metanol, do ânodo para o cátodo, que diminui o rendimento da célula, o que pode ser melhorado com configuração de membranas multicamadas (HOSSEINPOUR et al., 2019). Outra possível solução seria a troca do eletrólito, substituindo a membrana nafion por outro polímero condutor iônico ou compósito polímero-cerâmico. Algumas vantagens do etanol sobre o metanol em DEFC são o fato de ser obtido da biomassa (o metanol é produzido 99% de fontes fósseis), ser menos tóxico e conferir menos permeabilidade da membrana nafion. Entretanto, a oxidação completa

da molécula de etanol tem a desvantagem de necessitar energia extra para a ruptura da ligação C-C (LINARDI, 2010).

A PAFC é baseada no uso de ácido fosfórico como eletrólito. Não tem sensibilidade ao dióxido de carbono (CO_2) além de ter alta estabilidade relativa do ácido fosfórico, comparada com outros ácidos comuns. Pode operar a temperaturas de 200 °C - aliás o ácido fosfórico concentrado minimiza a pressão de vapor de água na célula. Pode ser usada com uma variedade de combustíveis de hidrocarbonetos leves e mais limpos como o gás natural, nafta ou metanol com o processo de reforma apropriado. Pode ser utilizada para operações estacionárias com eficiência elétricas de 45%, mas de acordo com SAMMES et al. (2004) quando utilizado em aplicações de ciclo combinado de calor e energia pode atingir eficiência total de até 87%. Utiliza grafite ou compósitos à base de carbono como placas bipolares. Algumas vantagens que apresenta são: tolerância ao CO, até 1%, com temperatura de 200°C; operação simples de baixa manutenção e possibilidade de usar metano como combustível. No entanto, a desvantagem é que precisa de eletrocatalisadores de metais nobres como platina (Pt) (LINARDI, 2010).

A MCFC caracteriza-se pela utilização de eletrólitos formados de uma mistura, ou uma solução, de carbonatos fundidos de metais alcalinos, por exemplo, carbonato de lítio (LiCO_3), carbonato de sódio (NaCO_3) e carbonato de potássio (KCO_3), numa matriz suporte de aluminato de lítio (LiAlO_2). Este tipo de célula é classificado de alta temperatura de operação (600°C) e, portanto, é apropriada para aplicações estacionárias de geração de energia elétrica e calor (cogeração). O estudo de Roy et al. (2020) mostra como uma MCFC num sistema híbrido de energia com gasificação da biomassa tem eficiência de 40,8%, comparável a sistemas de grande escala. Atualmente as MCFC têm eficiência elétrica entre 50% e 60% e combinada com cogeração, a eficiência global pode alcançar valores de 85% ou mais. Os dois eletrodos têm uma estrutura à base de níquel (Ni), que possui uma boa atividade eletrocatalítica na temperatura elevada. O ânodo consiste de uma mistura de Ni e cromo (Cr) (10% de Cr são requeridos para manter a porosidade na estrutura do ânodo). O cátodo consiste num cermet¹⁹ de NiO e Li. No eletrólito, o íon trocado é o CO_3^{2-} (KORDESCH & SIMADER, 2006).

A MCFC pode operar com uma variedade de combustíveis, como H_2 , gás natural, propano, gás de aterro sanitário, diesel e produtos de gaseificação de carvão. De acordo com Linardi (2010), as principais vantagens que apresenta são: cinética de eletrodo favorável;

¹⁹cermet: composto de materiais cerâmicos e metálicos.

insensibilidade ao CO_2 e CO ; maior capacidade de cogeração; possibilidade de reforma interna do combustível primário, pelo menos parcialmente; e dispensa de materiais nobres como catalisadores. As desvantagens são manejo do CO_2 ; volatilidade do sal fundido; problemas de materiais como corrosão, envelhecimento, expansão térmica entre outras.

Por último, a SOFC possui a particularidade de apresentar somente componentes sólidos, daí seu nome. As SOFCs fazem uso da propriedade importante da zircônia estabilizada com ítria (YSZ, *ytria stabilized zirconia*), onde zircônia é o óxido de zircônio e ítria é o óxido de ítria. A YSZ com 8% em mol de ítria, que estabiliza a fase cúbica da zircônia, passa a ser condutora de íons de oxigênio (O^{2-}) a partir de 800°C . As SOFCs pertencem às células de alta temperatura, entre 800 a 1000°C , podendo operar com qualquer tipo de combustível primário. Existe uma tendência de desenvolver células do tipo ITSOFC (*intermediate temperature SOFC*), que devem operar a faixa de temperatura de 650 a 700°C . As aplicações estacionárias, residenciais e industriais com cogeração são as mais adequadas para este tipo de célula, com potências de 1 kW até 1 MW ; e eficiência real térmica e elétrica de 70% (SINGHAL & KENDALL, 2003; SINGHAL, 2007).

As vantagens da SOFC são: cinética de reação favorável pela temperatura; uso exclusivo de componentes sólidos; polarização por ativação tende a zero; operação com qualquer tipo de combustível primário; insensibilidade ao CO_2 e CO ; possível reforma parcial interna de combustíveis primários; eficiência elevada; dispensa de materiais nobres como catalisadores; e maior capacidade de cogeração (eletricidade/calor) para uso industrial. As desvantagens são associadas a problemas de materiais, como compatibilidade, corrosão, envelhecimento, microestruturas, expansão térmica, etc; necessidade de condutividade mista entre eletrodos; volatilidade do Cr do interconector contamina o eletrólito YSZ; processos de fabricação complicados e caros; e necessidade de pré-reforma, pois o níquel presente no ânodo é sensível ao enxofre à elevada temperatura (LINARDI, 2010).

A Tabela 2.11 resume as principais características das CaC comentadas.

Tabela 2. 11. Vantagens e desvantagens de diversos tipos de células a combustível

Tipo	Eletrólito, Especie transportada, espessura (mm)	Faixa de temp. (°C)	Vantagens principais	Desvantagens principais	Aplicações
Alcalina AFC	KOH (OH ⁻) 2mm	60-90	Alta eficiência	Sensível a CO ₂ . Remoção de água. Gases ultrapuros.	-Naves espaciais -Aplicações especiais
Membrana PEMFC	Polímero: Nafion (H ₃ O ⁺) 0,1mm	80-90	Altas densidades de potência e eficiência. Operação flexível. Robustas	Custo de membranas e catalisadores. Contaminação de Pt por CO (tol. máx 100 ppm).	-Veículos -Naves espaciais -Unidades estacionárias
Ácido fosfórico PAFC	H ₃ PO ₄ (H ₃ O ⁺) Matriz SiC; 0,1mm	160-200	Maior desenvolvimento tecnológico	Controle de porosidade do eletrodo. Sensibilidade a CO (tol. máx 1%). Eficiência limitada por corrosão.	-Unidades estacionárias -Cogeração eletricidade/calor
Carbonato fundido MCFC	Carbonatos fundidos (CO ₃ ⁻²) Matriz LiAlO ₂ ; 0,5-1mm	650-700	Tolerância CO/CO ₂ . Eletrodos a base de Ni. Reforma interna na célula	Problema demateriais. Necessidade de reciclagem de CO ₂ . Interface trifásica de difícil controle. Corrosão.	-Unidades estacionárias -Cogeração eletricidade/calor
Cerâmicos SOFC	ZrO ₂ O ⁻² 50-100µm	800-1000	Alta eficiência, cinética favorável, reforma.	Problema de materiais. Problema de exp. térmica. Necessária pré-reforma.	-Unidades estacionárias -Cogeração eletricidade/calor

Fonte: Adaptado de Linardi (2010).

3. METODOLOGIA

O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para esta tese, contendo os procedimentos necessários para o dimensionamento de uma planta modelo de produção de NaClO a partir da água salgada do Chaco paraguaio. Como na região do Chaco existem áreas não atendidas pela rede de distribuição de energia elétrica, dois cenários alternativos foram analisados para garantir o suprimento elétrico da planta de NaClO: (i) a instalação de um sistema isolado híbrido de geração elétrica com aproveitamento energético local (solar fotovoltaico e do H₂ resultante do processo produtivo da planta); e (ii) a extensão da rede de distribuição da subestação elétrica.

Um estudo preliminar sobre a metodologia adotada no dimensionamento e operação de uma planta de produção de NaClO utilizando a energia solar fotovoltaica e o H₂ como vetor energético em CaC foi realizado em 2018 e resultou no artigo submetido ao 22nd WORLD HYDROGEN ENERGY CONFERENCE (WHEC), que ocorreu no Rio de Janeiro entre 18/06 e 22/06/2019. Tal artigo foi aprovado para apresentação oral e, posteriormente, selecionado para publicação em uma edição especial do periódico *International Journal of Hydrogen Energy*, publicado em 2020 (FRANCO LEON et al., 2020). O artigo completo se encontra no Apêndice da tese.

A partir desse estudo, a metodologia adotada para atender ao objetivo desta tese foi aprofundada e organizada em mais etapas, as quais são apresentadas no fluxograma da Figura 3.1 e detalhadas em seguida. Resumidamente, a metodologia envolve: levantamento de dados de localidades adequadas com presença de água salgada subterrânea no Chaco; determinação do volume de produção, tanto de NaClO como do H₂ associado; identificação de dois estudos de caso de atendimento da demanda de energia elétrica da planta, chamados de cenários, sendo um considerando o aproveitamento energético solar fotovoltaico e do H₂, e outro, a extensão da rede de distribuição local; dimensionamento dos equipamentos da planta para a produção de NaClO, bem como do reservatório externo e dos equipamentos usados no armazenamento do produto; estimativa dos custos associados aos dois cenários; e análise da viabilidade econômica da planta de NaClO proposta em cada cenário.

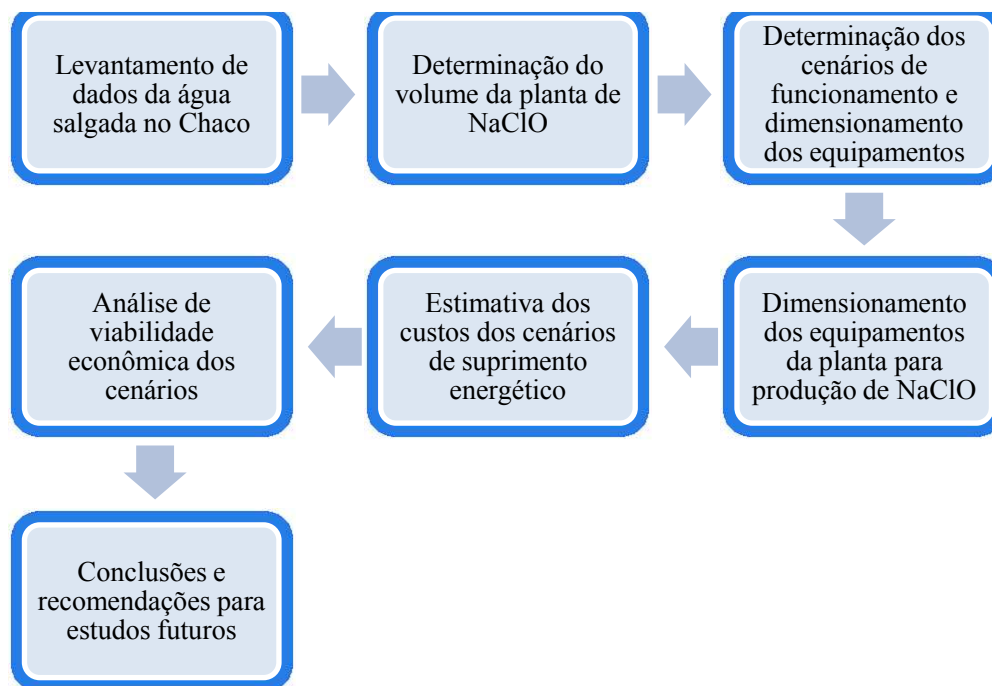


Figura 3. 1. Fluxograma do desenvolvimento metodológico

3.1. Levantamento de Dados da Água Salgada no Chaco Paraguaio

A primeira etapa envolveu a pesquisa para determinar a disponibilidade e viabilidade de se utilizar a água salgada no Chaco paraguaio. Baseado em estudos de análise físico-químicos já realizados em trabalhos anteriores de caracterização do tipo de água, localidade da amostra no Chaco central assim como em lagoas, concentrações de sais minerais, etc. foi possível avaliar o aproveitamento da água subterrânea.

Uma vez analisadas as concentrações de água subterrânea, de acordo como os dados do Anexo B, selecionou-se uma localidade que apresentasse água salgada em condições adequadas para a produção de NaClO. As concentrações dos sais minerais foram comparadas com as da água do mar, de acordo com valores da Tabela 2.4. Mesmo que existam vários poços prováveis de serem explorados, para fins de dimensionamento desta tese, e de forma a economizar ao não incorporar minerais adicionais aos que já se encontram na fonte, foi selecionado apenas o poço com características de água salgada ($\text{TDS} > 10.000 \text{ mg.L}^{-1}$) e concentração $\geq 3\%$ de NaCl. Com isso é possível utilizar diretamente a água nesta concentração para produzir NaClO.

A dureza da água (presença de cálcio e magnésio $< 17,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) e a concentração de SO_4^{-2} ($< 250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), mencionadas no Capítulo 2, devem ser atendidas, caso contrário será necessário tratamento prévio.

A concentração de SO_4^{-2} foi obtida da análise físico-químico da água realizada por outros estudos e analisada nesta tese. Caso essa informação não esteja disponível na literatura, deve ser calculada a partir de parâmetros, como a CE do poço analisado (Equação 2.1); a constante da localidade K; e o TDS na água do poço. A Equação 2.2 permite determinar o TDS do poço com a CE e a constante K, que depende da localidade, segundo Cristaldo (2002), também mencionado no Capítulo 2.

A localidade que apresentou teor de NaCl adequado e menor teor de SO_4^{-2} foi escolhida por demandar menor tratamento de água. Assim, antes de ingressar à planta, a água salgada deve ser bombeada dos poços para o abrandador, que tem resinas para eliminar a dureza e o SO_4^{-2} .

3.2. Determinação do Volume de Produção da Planta de NaClO

Como nesta tese o objetivo é a substituição da importação de NaClO com a produção local, determinou-se o volume de produção adequado da planta tendo em conta a importação do Paraguai, mostrado na Figura 2.17, assim como o preço no mercado local, ano base 2017.

No mercado local, o NaClO é comercializado em diversas concentrações, tais como 2,5%, 4% e 6%. No entanto, o eletrolisador produz a uma concentração fornecida pelo fabricante, de 12,5% até 15%, segundo Klorigen (2010), Black & Veatch (2010) e Perry & Green (1997), o que permite a diluição para atender às concentrações demandadas.

Logo, o volume de produção anual de NaClO pode ser estimado pela razão entre a quantidade importada anualmente em US\$ e o preço do NaClO em $\text{US}\cdot\text{L}^{-1}$ à concentração estabelecida pela curva de preços versus concentração. Uma vez calculado o volume de produção anual, considerando a demanda por paradas para operação e manutenção (O&M) de 15 dias (FATONE, 2007), estimou-se a produção diária para 350 dias de operação da planta.

3.3. Determinação dos Cenários de Funcionamento e Dimensionamento dos Equipamentos

Em seguida, considerou-se a possibilidade de garantir o suprimento de energia elétrica da planta a partir de um sistema isolado – Cenário 1 – e um sistema conectado à rede de distribuição – Cenário 2.

O Cenário 1 considerou a instalação de um sistema híbrido solar fotovoltaico/ H_2 /CaC, que se configura como uma alternativa de aproveitamento energético local, tanto na forma de energia solar quanto do H_2 obtido como subproduto do processo de produção de NaClO. Assim, todo o H_2 produzido foi armazenado para a geração elétrica na planta através do uso da CaC e, quando for o caso, comercializado. Uma vez que o sistema solar fotovoltaico (SFV) não tenha gerado a energia elétrica suficiente para abastecer os requerimentos diários da planta de hipoclorito, o H_2 armazenado na produção foi utilizado através da CaC, complementando a oferta de energia do SFV. Caso o SFV esteja atendendo a demanda diária, e os tanques de H_2 estejam cheios, o gás pode ser usado para aumentar a produção até o seu esgotamento nos tanques ou pode ser comercializado. A Figura 3.2 mostra o esquema de funcionamento do Cenário 1. Os equipamentos adotados neste cenário incluíram o SFV completo, o compressor de H_2 , o tanque de armazenamento de H_2 e a CaC, os quais foram dimensionados para atender à operação proposta.

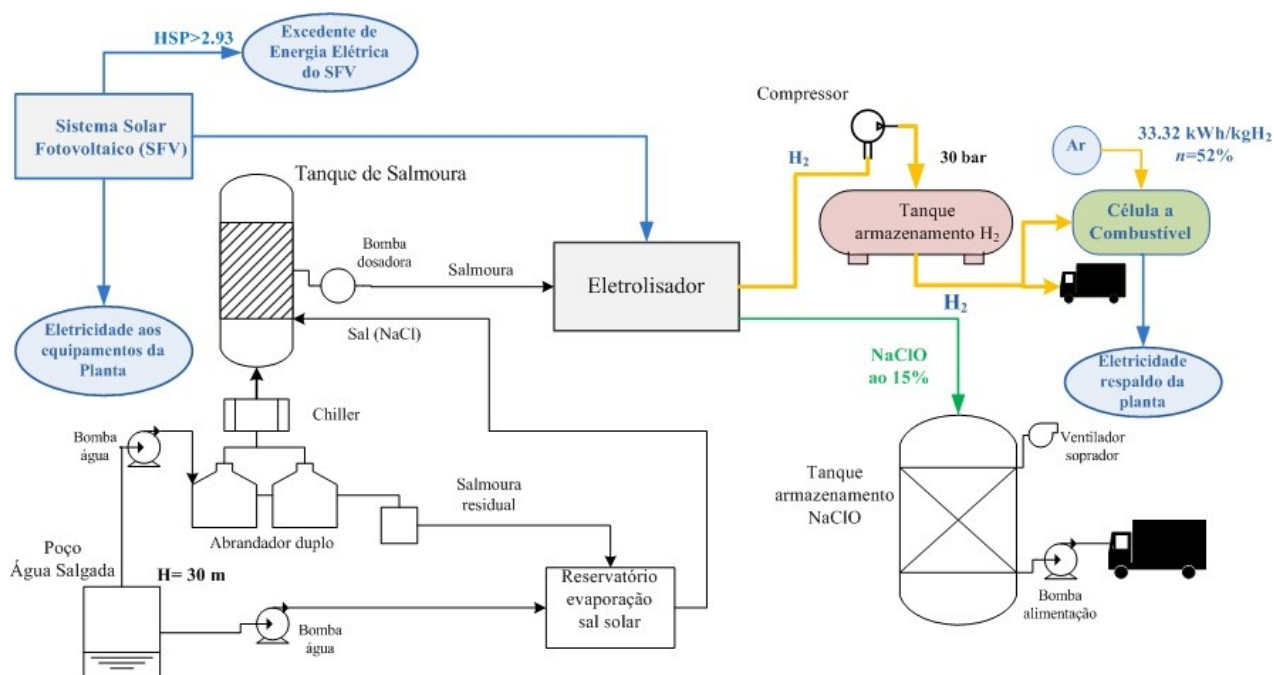


Figura 3. 2. Esquema de funcionamento da planta no Cenário 1

Já o Cenário 2 considerou a extensão da rede de distribuição da localidade a partir do alimentador mais próximo à planta de NaClO. Neste caso, o H_2 gerado do processo produtivo foi armazenado em tanques e comercializado. A Figura 3.3 mostra o esquema de funcionamento deste cenário, que serviu de referência para o dimensionamento de todos os equipamentos e materiais necessários. A grande maioria dos equipamentos adotados na planta de produção de NaClO consomem energia elétrica e, por isso, um levantamento do consumo de cada um foi realizado ao longo dos respectivos dimensionamentos.

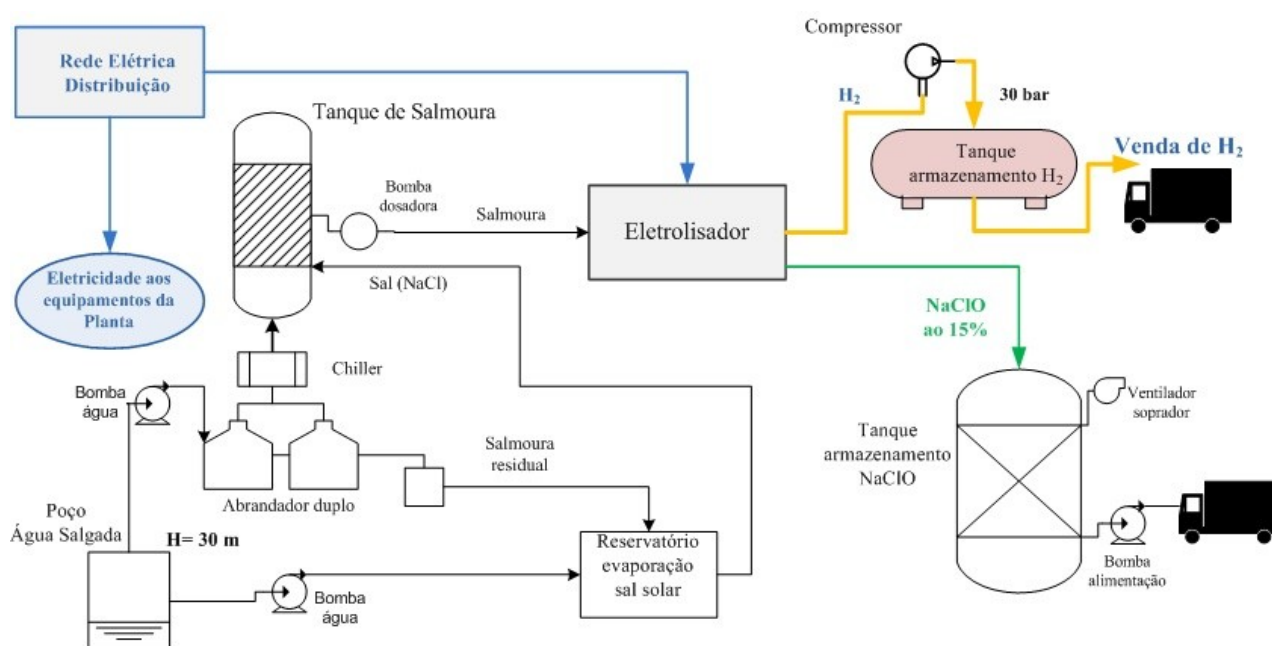


Figura 3. 3. Esquema de funcionamento da planta no Cenário 2

3.4. Dimensionamento dos Equipamentos da Planta Local de Produção de NaClO

Uma vez estimados o volume de produção de NaClO da planta local e os cenários de operação, foram dimensionados os equipamentos necessários para sua produção. Os equipamentos considerados foram: o tanque saturador de salmoura; o abrandador de água natural do poço; o aquecedor e o resfriador, caso necessários; o eletrolisador; bombas do tanque de salmoura, do reservatório externo, do dosador e de alimentação; o tanque de armazenamento de NaClO; o reservatório externo; o sistema de armazenamento de H_2 e seu compressor. A CaC e o SFV para o Cenário 1 também foram dimensionados.

Dado que o subproduto H_2 será de alguma forma utilizado pela planta local, não foi considerado o dimensionamento do tubo vertical que o dilui ao misturar com ar e expulsa o gás para a atmosfera. Porém, como já mencionado, torna-se necessário eliminar o H_2 restante que pode sair com o NaClO, devido ao seu LEL. Caso ocorra fuga deste gás, considerou-se como uma perda de H_2 na produção.

De acordo com Black & Veatch (2010), alguns fabricantes optam por usar um método alternativo para remoção de H_2 , que inclui a transferência de NaClO diretamente das células eletrolíticas para o tanque de armazenamento. Para garantir a remoção do H_2 , os bicos não devem ser localizados na parte superior do tanque de NaClO e cada tanque deve ter sua própria ventilação, com sopradores dedicados a cada tanque. O tanque deve ser preenchido por baixo e um transmissor de nível de pressão diferencial deve ser usado no sistema de controle. Um orifício de ventilação torna-se necessário no tanque para a vazão de ar. Além disso, para manter 25% de LEL de H_2 , quando a concentração do gás atingir 1% em volume, um alarme é aceso, e ao atingir 2% a produção é interrompida (BLACK & VEATCH, 2010). Os sopradores do tanque foram descritos no dimensionamento do tanque de NaClO.

O dimensionamento dos equipamentos de produção, detalhado a seguir, permitiu ajustar o volume de forma mais precisa, assim como os consumos elétricos necessários na planta local.

3.4.1. Tanque saturador de salmoura

Antes de calcular a vazão diária de entrada ou reposição de água salgada do poço (Q_p) que passará pelo abrandador, deve-se calcular a concentração e vazão diária de saída do tanque saturador de salmoura (Q_s). Deve-se manter no tanque uma concentração de 26,4% de NaCl. O mesmo tanque deve suprir o eletrolisador com uma concentração adequada, fornecida pelo fabricante.

De acordo com a Tabela 2.3, determinou-se a quantidade de Cl_2 produzido, em kg, de acordo com a concentração de hipoclorito definido, no caso 15%, em litros. Posteriormente, com o Cl_2 produzido, calculou-se o Q_s com a quantidade de água por kg de Cl_2 . O Q_p foi estimado pela relação de concentração de salmoura no tanque e do eletrolisador.

A massa de NaCl de reposição foi calculada pela relação de concentrações tanque salmoura-eletrolisador; pela quantidade de sal por kg de cloro, fornecida pelo fabricante; e pelos dias de funcionamento da planta por mês, já que o dimensionamento para armazenamento típico é de 30 dias, mencionado no Capítulo 2, de acordo com Black &

Veatch (2010). O material usado no tanque, levando em consideração o volume demandado, foi determinado como sendo plástico reforçado em FRP ou com PEAD.

3.4.2. Abrandador de água

A partir da classificação da dureza da água salgada, de acordo a Tabela 2.6, pode-se determinar a frequência de limpeza das células na O&M, descrita no Capítulo 2.

A quantidade de resina (grãos por gal) foi estimada pela Equação 3.1, considerando o valor desejado para cada composto, CaCO_3 e MgCO_3 , que corresponde a $< 17,1 \text{ mg.L}^{-1}$ para ambos.

$$\frac{\text{mg.L}^{-1}\text{CaCO}_3}{17,1} = \frac{\text{grãos resina}}{\text{gal}} \quad (3.1)$$

Considerando ainda o volume de reposição diário, estimado anteriormente, e o tempo em dias antes da regeneração, obteve-se pela Equação 3.2 a quantidade de grãos de resina para ajustar a dureza da água.

$$\frac{\text{Grãos}}{\text{gal}} \times \frac{\text{gal}}{\text{dia}} \times \text{dia} = \text{Grãos} \quad (3.2)$$

Para o ajuste da concentração de SO_4^{-2} deve-se considerar o limite que o tipo de abrandador define para estimar a quantidade de resina a ser usada com a Equação 3.2. A partir da estimativa de resina necessária, pode-se selecionar o tamanho e modelo de abrandador a ser usado. De acordo com o fabricante ACS (2020), um abrandador de volume de $0,028 \text{ m}^3$ (1 ft^3) pode conter até 30.000 grãos de resina (VERLEK, 2019).

O método de regeneração da resina pode ser em linha ou em separado. Para a regeneração da dureza com salmoura, estabeleceu-se a relação entre os poços de extração/abrandador-salmoura/tanque saturador. Primeiramente calculou-se uma concentração inicial de água do tanque saturador de 36,4% e no abrandador sem sal (0%), de forma a obter no final 26,4% no tanque saturador e 10% no abrandador, conforme Equação 3.3, segundo recomendação de Cervantes Anagonó (2015) e Black & Veatch (2010) para maior eficiência no ciclo de regeneração. Os mesmos também recomendam entre 3,6 a 6,8 kg de NaCl por $0,028 \text{ m}^3$ de resina (8 a 15 lb de NaCl por ft^3 de resina). Nesse caso, precisou-se de 1,36 kg (3 lb) de NaCl para cada 3,7854 L (1 gal) de água (ROHN & HASS, 1988).

$$V_s \cdot C_s = V_w \cdot C_w \quad (3.3)$$

Onde:

V_s : volume de solução de salmoura do tanque;

C_s : concentração da solução (%);

V_w : volume de água no abrandador;

C_w : concentração da solução no abrandador (%).

O tempo de contato (t_c) que o regenerante tem com o leito de resina deve considerar o volume de água do abrandador (V_w), a faixa de 2 a 4 BV.h⁻¹ (Bed Volume²⁰), a relação equivalente no qual 0,028 m³(1 ft³) corresponde a 28 L.BV⁻¹ e o volume do abrandador selecionado (V_a) (BARUTH, 1990). Assim, pela Equação 3.4 estima-se o t_c .

$$t_c = \frac{V_w}{V_a * (\text{equiv 1 ft}^3 \text{ de resina})} \quad (3.4)$$

Onde:

V_a : volume do abrandador selecionado (ft³);

56,02 L.h⁻¹ (14,8 gal.h⁻¹) = equivalência para 1 ft³ de resina (considerando 2 BV.h⁻¹ e 28 L.BV⁻¹).

Considerando o volume de água do abrandador e o tempo de contato, estimou-se a vazão volumétrica regenerante (Q_{rg}) pela Equação 3.5.

$$Q_{rg} = \frac{V_w}{t_c} \quad (3.5)$$

Para o abrandador de sulfato, calculou-se a quantidade de soda cáustica para a regeneração, entre 50 a 60 kg de NaOH a 100% para cada 1m³ (35,3 ft³) de resina aniônica forte (VALENCIA & RODRIGUEZ, 2008). Neste caso, a água a ser tratada passa primeiro pela resina fraca para eliminar sulfato e depois pela resina forte, para eliminar o cálcio e magnésio. Pelo contrário, no processo de regeneração, o regenerante passa primeiro pela resina forte (salmoura) e logo pela resina fraca (soda cáustica).

3.4.3. Aquecedor de água

Segundo recomendações mencionadas no Capítulo 2, a temperatura mínima da água deve ser > 10°C nos meses mais frios para que não seja necessário o uso do aquecedor. No

²⁰Bed Volume: corresponde ao volume por hora de líquido a ser tratado (neste caso água) / volume de resina.

entanto, deve-se levar em conta também a temperatura ideal da água de 18,75°C no processo de eletrólise do cloreto de sódio, citada no Capítulo 2, para a decisão sobre o uso do aquecedor de água.

A estimativa da demanda de energia do aquecedor de água pode ser realizada a partir da Equação 2.8, que considera a vazão mássica, o calor específico e a diferença de temperatura da água, bem como um fator de segurança de 20% para compensar as perdas de energia na forma de calor.

$$D_{aq}=1,2 \times M \times C_p \times \Delta T$$

Onde:

D_{aq} : demanda de energia do aquecedor(kcal.h⁻¹);

1,2: fator de segurança 20%;

M: vazão mássica água (kg.h⁻¹);

C_p : calor específico ($1 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C.kg}} = 4.184 \frac{\text{J}}{\text{K.kg}}$ água);

ΔT : diferença de temperatura (°C).

3.4.4. Resfriador de água (*chiller*)

Esse equipamento é necessário para adequar a temperatura da água de forma a não prejudicar o funcionamento das células eletrolíticas, que podem ser afetadas em temperatura >26,7°C. Caso seja necessária sua utilização, a demanda de energia foi estimada da mesma forma que para o aquecedor de água (Equação 2.8). Pela curva de Faraday, observada na Figura 2.16, a diferença de temperatura considerou para o funcionamento eficiente das células eletrolíticas a temperatura ideal da água (18,75 °C) e a máxima temperatura da água na localidade.

3.4.5. Eletrolisador

Para o caso do eletrolisador, em ambos cenários se considerou a quantidade de cloro produzido, em kg, calculada previamente para a seleção do equipamento mais adequado. Como a disponibilidade diária de energia elétrica é diferenciada para cada cenário, eletrolisadores de capacidade diferentes serão adotados ²¹.

Os eletrolisadores alcalinos, com NaOH como eletrólito, da marca *Klorigen* são bastante empregados para a produção de NaClO (KLORIGEN, 2020), possuindo uma gama

²¹ Além disso, ainda que haja intermitência da irradiação solar, considerou-se que o eletrolisador deverá operar adequadamente.

variada de modelos. A partir da seleção do eletrolisador, pôde-se estimar o consumo de energia elétrica do equipamento considerando o consumo energético, em kWh.kg^{-1} de cloro; e a eficiência do equipamento, ambos normalmente fornecidos pelo fabricante. Estes dados foram considerados em ambos cenários na produção de H_2 , nas bombas de dosagem e no custo da planta.

3.4.6. Ventilador do tanque de NaClO

O tanque em FRP recebe o NaClO, o qual pode ser armazenado por 3 dias de produção com vazão média, ou 1 dia à vazão máxima. Este tempo de armazenamento leva em consideração o fato do NaClO se degradar lentamente ao longo do tempo para formar cloreto de sódio, clorato de sódio (NaClO_3) e oxigênio. O processo de degradação reduz o teor de cloro disponível e produz subprodutos indesejáveis, de acordo com Black & Veatch (2010).

A perda de NaClO por armazenamento pode ser estimado pela curva da Figura 3.4, onde uma concentração no tanque de até 15% de NaClO pode atingir 4,8%, em 120 dias à $37,8^\circ\text{C}$ (100°F).

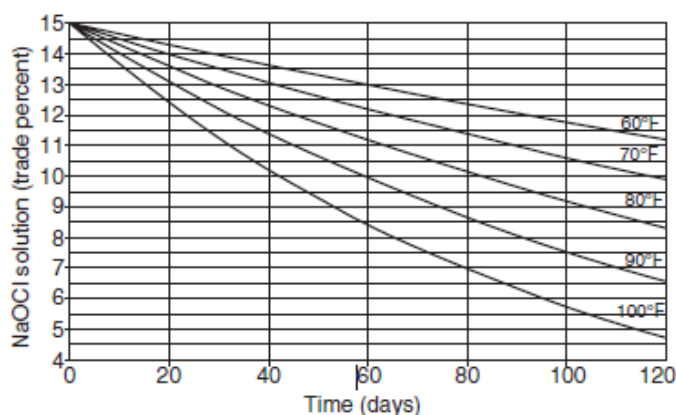


Figura 3. 4. Perda de NaClO por armazenamento

Fonte: Black & Veatch (2010).

Conforme comentado no Capítulo 2, por uma questão de segurança é necessário adotar um ventilador para garantir a eliminação do H_2 indesejado do tanque de NaClO. Ainda que na tese esteja previsto o aproveitamento desse gás, e não sua emissão ao ar, foi considerado o dimensionamento do ventilador de forma preventiva, diante de possíveis situações de vazamento de H_2 . Para estimar a demanda de energia dos ventiladores, considerou-se inicialmente a relação entre o volume de Cl_2 e H_2 produzidos nas células na proporção mássica de 1:0,03 (1 kg Cl_2 produzido para 0,03 kg H_2 produzido). Em seguida, com a Equação 3.6

estimou-se a vazão molar diária de H_2 (M_{H_2}) que deve ser soprada do tanque, a partir da produção de H_2 (P_{H_2}) e da massa molecular do H_2 .

$$M_{H_2} \left(\frac{\text{lb.mol } H_2}{\text{dia}} \right) = \frac{P_{H_2} \left(\frac{\text{lb } H_2}{\text{dia}} \right)}{2,01596 \frac{\text{lb } H_2}{\text{lb-mol } H_2}} \quad (3.6)$$

Para o valor de segurança (LEL) de 1% em volume de ar e fator de segurança 4 (FS), recomendado por Black & Veatch (2010), a Equação 3.7 mostra a vazão molar de ar (M_{ar}) necessária para ventilar o H_2 do sistema.

$$M_{ar} \left(\frac{\text{lb.mol ar}}{\text{dia}} \right) = M_{H_2} \left(\frac{\text{lb.mol } H_2}{\text{dia}} \right) \times \underbrace{\frac{1 \text{ ar}}{0,01 H_2}}_{1\%} \times FS \quad (3.7)$$

Posteriormente, para o cálculo da vazão de ar (Q_{ar}) na Equação 3.8 considerou-se a pressão do ar como a atmosférica ($P_{ar} = P_{atm} = 14,7$ psia) e a temperatura padrão do ar (em Rankine), de acordo com Black & Veatch (2010). A partir do ajuste da vazão, transformando de lb-mol.dia^{-1} a lb-mol.min^{-1} , obteve-se a vazão Q_{ar} .

$$Q_{ar} \left(\frac{\text{ft}^3 \text{ ar}}{\text{min}} \right) = \left[M_{ar} \left(\frac{\text{lb.mol ar}}{\text{min}} \right) \times T_{ar, R} \times \left(10,73 \frac{\text{ft}^3 \cdot \text{psia}}{\text{lb.mol} \cdot ^\circ R} \right) \right] / P_{ar} (\text{psia}) \quad (3.8)$$

Em seguida, com as Equações (Eq.2.15) à (Eq. 2.19), apresentadas no Capítulo 2, pôde-se dimensionar o consumo elétrico dos ventiladores de H_2 do tanque de NaClO .

3.4.7. Bombas de água e alimentação

Para a operação da planta são necessárias duas bombas de água: uma para reposição de água no tanque saturador e a outra para o reservório de evaporação. Além disso, é necessário também uma bomba dosadora e outra de alimentação de NaClO .

Para a bomba do tanque saturador, considerou-se o volume de reposição (Q_p) à vazão de água mole posterior ao abrandador. A altura manométrica leva em conta a profundidade dos poços cadastrados (CRISTALDO, 2002) e a bomba é mantida submersível.

A bomba de extração para o reservatório, também submersível no mesmo poço, levará água ao reservório de evaporação de sal. Para estimar a vazão de água bombeada, considerou-se a quantidade de sal mensalmente demandada, a 3% de concentração.

Duas variáveis devem ser consideradas para o dimensionamento do medidor-dosador de salmoura: a vazão volumétrica diária do sistema de geração local, ou seja, do eletrolisador; e a concentração do NaClO (%). A recomendação para uma produção adequada é 3406,9 L.h⁻¹ (15 gpm) de água por 3,7854 L (1 gal) de NaClO (12,5%) (BLACK & VEATCH, 2010 pg 499). Neste caso, 26,4% em massa da salmoura saturada do tanque saturador dilui-se na concentração demandada pela célula eletrolítica.

Para a seleção da bomba dosadora considerou a vazão de dosagem (Q_s) para o eletrolisador em cada cenário, que depende do tempo de funcionamento. E a bomba de alimentação deverá carregar em caminhões o hipoclorito a 15% de concentração armazenado por 3 dias no tanque.

3.4.8. Reservatório externo

Além dos equipamentos de produção da planta, para obter o sal solar necessário nas concentrações no tanque de salmoura, uma opção é realizar a evaporação de água salgada em reservatórios abertos, como os do tipo tajamar²² ou tanque australiano²³ aberto, vistos na Figura 3.5 (HARDER, 2017). De acordo com Lenntech (2020), à medida que a água evapora, os sais minerais ficam na superfície, sendo um método adequado para taxa de precipitação menor que 0,3 m.ano⁻¹ e para taxa de evaporação maior que 1,0 m.ano⁻¹, de tal forma que a diferença dos regimes de evaporação e de precipitação seja igual ou maior que 0,7 m.ano⁻¹.

A razão entre a vazão volumétrica mensal de água bombeada do poço ao reservatório (Q_{ag}, em m³.mês⁻¹) e a diferença média entre a taxa de evaporação e de chuvas mensais (T_{evap} e T_{prec}, respectivamente, em m.mês⁻¹) permite calcular a área do tanque evaporador (A_{res}), como mostra a Equação 3.9. A vazão volumétrica considera a quantidade de sal solar adicional ao tanque saturador, que provém de um poço com 3% de concentração de NaCl.

$$A_{res} = \frac{Q_{ag}}{T_{evap} - T_{prec}} \quad (3.9)$$

²² Tajamar: Barragem ou pequeno dique.

²³ Tanque australiano: tecnologias circulares de armazenamento de água. As paredes do perímetro são geralmente feitas de chapa galvanizada, concreto ou terra.

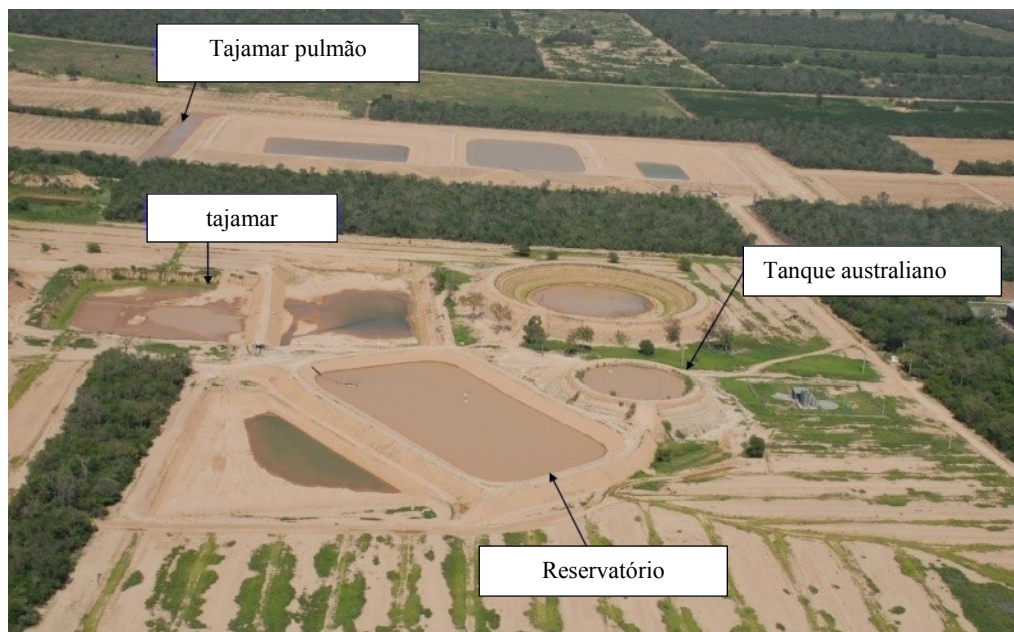


Figura 3. 5. Sistema de reservatório, tajamar e tanque australiano

Fonte: HARDER (2017).

3.4.9. Sistema de armazenamento de H_2

Para o armazenamento de H_2 adotou-se o sistema por compressão, que apesar de demandar energia no processo, permite o armazenamento adequado para a operação planejada. O H_2 quente e úmido que sai do eletrolisador, foi considerado resfriado antes de entrar ao compressor - dessa forma pode ser comprimido mantendo a pureza necessária na CaC.

Existe uma gama de tanques pressurizados no mercado e a seleção do adequado leva em conta alguns parâmetros, como a pressão de descarga, os tipos de compressores, a qualidade do H_2 armazenado (não pode ser contaminado pelo óleo lubrificante usado no compressor), o material de selagem do compressor, etc. Uma sugestão são os tanques da ELT *Elektrolyse Technik*, utilizados nos estudos de Varkaraki (2009) & Espínola (2013).

Ainda de acordo com Varkaraki (2009), um compressor de diafragma seria adequado para comprimir o H_2 produzido até uma pressão de armazenamento, em virtude da necessidade de garantir a qualidade do gás mencionada. Um exemplo são alguns modelos de compressores da marca PDC Machines, especialmente desenhados para gases industriais como o H_2 (PDC, 2020).

A partir da vazão diária de H_2 e da vazão especificada do compressor, foi possível estimar o tempo de compressão.

3.4.10. Célula a combustível (CaC)

A CaC, no Cenário 1, será alimentada com o H₂ eletrolítico derivado do processo de produção de NaClO e a energia elétrica gerada complementarà aquela decorrente do sistema solar fotovoltaico instalado.

Normalmente a CaC utilizada em plantas de eletrólise são do tipo PEM (FURLAN, 2012 e GAMBETTA, 2010). Existem alguns fabricantes e modelos que podem atender essa demanda e buscou-se selecionar aquele que disponha de mais informações quanto a sua operação e aos resultados obtidos.

Asumiu-se em função da ausência de maior informação da pureza de H₂ obtido no processo, que o mesmo é adequado para alimentar uma CaC do tipo PEM de forma direta. Uma comparação entre plantas de NaClO com células do tipo Membrana (utilizada no dimensionamento da tese) e as do tipo Mercúrio e Diafragma mostra que é vantajoso o uso daquela por não precisar de tratamento posterior do H₂ para seu uso, dado que as do tipo Membrana conseguem separar adequadamente os produtos sem contaminação com Mercúrio ou Asbesto (nos eletrolisadores do tipo Diafragma).

3.4.11. Sistema solar fotovoltaico (SFV)

Considerando os consumos elétricos de cada equipamento dimensionado, foi possível projetar o SFV necessário para atender a demanda completa da planta de NaClO.

O SFV no Cenário 1 foi dimensionado considerando a irradiação solar na localidade em que a planta será instalada. Para garantir a produção contínua considerou-se a menor irradiação solar local, a eficiência média de SFV e adequou-se ao atendimento do consumo elétrico dos equipamentos da planta de NaClO, incluindo das bombas de extração de água do poço.

Em seguida, utilizou-se o software PVSyst 7.0 para detalhar de forma mais precisa o SFV. O software permite dimensionar e simular a produção de energia elétrica a partir de bases de dados de irradiação, tais como da NASA e de Meteonorm.

A partir dos valores encontrados, foi possível avaliar as diferenças e optar pelo resultado mais condizente.

3.5. Estimativa dos Custos dos Cenários de Funcionamento

Uma vez dimensionados os equipamentos da planta local de NaClO, foram calculados os custos dos equipamentos, dos insumos para a produção e das tecnologias para fornecimento da energia elétrica nos dois cenários propostos. O custo da produção de NaClO foi o mesmo para os dois cenários. Para o Cenário 1, considerou-se ainda os custos de investimento do tanque de armazenamento e do sistema adicional de compressão de H₂, da CaC e da planta SFV. No caso de ocorrer a comercialização da eletricidade, aplicou-se a tarifa média em baixa tensão da ANDE.

Já para o Cenário 2, manteve-se o custo de investimento do tanque de armazenamento e do sistema de compressão de H₂ e incluiu-se a implantação do sistema elétrico de distribuição até a planta e o consumo de energia elétrica. Neste caso, a extensão de linha de distribuição deve ser feita desde o posto de distribuição mais próximo, ou da subestação, até a planta local. O custo modular por quilômetro de linha, US\$.km⁻¹, permitiu calcular o custo do sistema elétrico. A tarifa industrial da ANDE foi considerada para o custo da eletricidade da planta local (ANDE, 2019), devido ao convênio entre a ANDE e a Cooperativa encarregada da distribuição local da eletricidade.

Para a estimativa do custo com os insumos, considerou-se os dados apresentados na Tabela 3.1, coletados por SEMARNAT (2010) e outras referências.

Em função da ausência de informação para estimativa do custo de investimento de uma planta eletrolítica dedicada à produção de NaClO, adotou-se o custo unitário da planta de eletrólise (C_u) para produção de H₂. Tal custo pode ser estimado a partir da capacidade de produção deste gás, mostrado na Equação 3.10, conforme Campanholo (2016). No caso desta tese, tomou-se como base o H₂ produzido como subproduto da produção de NaClO para estimar o C_u da planta.

$$C_u = 2350,9 \cdot CP^{-0,1038} \quad (3.10)$$

Onde:

C_u: custo unitário da planta de eletrólise (US\$.kW⁻¹);

CP: capacidade de produção de H₂ da planta (m³.h⁻¹).

Tabela 3. 1. Custo dos insumos para tratamento de água da planta de NaClO que produz 11975 kg H₂.mês⁻¹

Materia prima	Quantidade	Custo (US\$)*	Fonte
NaCl (sal industrial)	20000 kg/mês 3,5 kg NaCl/kg Cl ₂	0,72 (US\$/kg)	(SEMARNAT,2010); (SEDECO, 2017) (BLACK&VEATCH, 2010)
Tiosulfato de sódio	4500 kg/mês	0,36 (US\$/kg)	(SEMARNAT,2010) (QUIMINET, 2017)
Soda cáustica 50% (NaOH)	81000 L/mês	0,81 (US\$/L)	(SEMARNAT,2010)
Ácido Clorhídrico (HCl)	52000 L/mês	0,84 (US\$/L)	(SEMARNAT,2010)
Carbonato de Sódio (Na ₂ CO ₃)	7150 kg/mês	0,31 (US\$/kg)	(SEMARNAT,2010)

* (1 US\$ em 2017 = 5500 Gs.).

Fonte: Adaptado de SEMARNAT (2010).

O custo anual de capital e operação e manutenção ($C_C + C_{O\&M}$) considera todos os custos associados à planta de produção, excluindo o custo do insumo energia elétrica (CAMPANHOLO, 2016) e foi estimado pela Equação 3.11.

$$C_C + C_{O\&M} = (FRC + O\&M) \cdot C_u \cdot Pot \quad (3.11)$$

Onde:

FRC: fator de recuperação de capital anual (%);

O&M: taxa anual do custo com operação e manutenção (%);

C_u: custo unitário da planta (US\$.kW⁻¹);

Pot: potência da planta de eletrólise (kW).

O FRC é um parâmetro econômico que depende da taxa de desconto e do período de recuperação de capital, sendo estimado através da Equação 3.12.

$$FRC = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (3.12)$$

Onde:

d: taxa anual de desconto (%);

n: número de anos para a amortização do capital investido na planta (vida útil da planta).

3.6. Análise de Viabilidade Econômica dos Cenários

Posteriormente, na análise viabilidade econômica considerou-se o método do Valor Presente Líquido (VPL), pela Equação (3.13); e a estimativa da Taxa Interna de Retorno (TIR).

$$\text{VPL (i)} = \sum -I + \left[\frac{\text{FC}_j}{(1+i)^j} \right] \quad (3.13)$$

Onde:

I: investimento;

i: taxa de desconto;

J: período genérico ($j = 0$ a $j = n$), percorrendo todo o fluxo de caixa;

FC_j: fluxo genérico para $t = [0... n]$ que pode ser positivo (ingressos) ou negativo (desembolsos);

VPL(i): valor presente líquido descontado a uma taxa i ;

N: número de períodos do fluxo.

A TIR é o índice que indica a rentabilidade de um investimento por uma unidade de tempo (MOTTA & CALÔBA, 2002) e representa a taxa de juros compostos que irá retornar o VPL de um investimento com valor 0 (zero).

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Este capítulo apresenta os resultados e análise da proposta de uma planta de produção de NaClO no Chaco paraguaio seguindo a metodologia descrita no Capítulo 3 para dois cenários de oferta de energia elétrica, permitindo avaliar a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético local, seja através do sistema isolado híbrido solar fotovoltaico/H₂/CaC, seja com a extensão da rede de distribuição de eletricidade.

4.1. Levantamento de Dados da Água Salgada do Chaco Paraguaio

Como já comentado, mesmo que existam vários poços prováveis de serem explorados na região, de acordo com a Tabela 2.3 do Capítulo 2, e do Anexo B, um poço com características de água salgada (TDS > 10.000 mg.L⁻¹) e com concentração $\geq 3\%$ de NaCl é adequado para abastecer a planta local de produção de NaClO. Um poço com concentrações menores que 3% precisaria adicionar insumos para adequar a qualidade da água, incrementando o custo da planta. Assim, foram comparadas as concentrações de Cl⁻ e Na⁺ com as concentrações mostradas no Anexo B. Como resultado, foram analisados o Poço 1 na Lagoa Curacao, ao norte de Loma Plata; e os poços na Lagoa Ganso. As concentrações das amostras consideradas são apresentadas na Tabela 4.1.

Pode-se verificar pela Tabela 4.1, que as concentrações do Poço 1, na Lagoa Curacao, mesmo sem diluição, têm características similares tanto à água subterrânea na estação Melikhoyskaya, quanto à água pura com NaCl a 3%. Neste caso, considerando a análise físico-química do Poço 1 na Lagoa Curacao, as concentrações seriam de:

- Na: 13.404 (mg.L⁻¹)
- K: 122 (mg.L⁻¹)
- Cl: 16.224 (mg.L⁻¹)
- Concentração NaCl: 29.628 mg.L⁻¹ $\approx 2,96\%$

Fazendo a diluição adequada até atingir 3% de NaCl em volume, a água da Lagoa Ganso pode ser utilizada também como fonte de água salgada para a planta local, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4. 1. Concentrações dos poços da Lagoa Curacao e da Lagoa Ganso com relação a água com 3% NaCl

Índice	Poço 1 Lagoa Curacao-Noreste Loma Plata		Lado Direito Lagoa Ganso Estância Batel		Lado Direito Lagoa Ganso Estância Batel (3 % NaCl)		Água mineralizada subterrânea (Melikhoyskaya) diluída 3% NaCl		Tabela solução sal (3% NaCl)	
	Concentração									
	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	mEq.L ⁻¹
Ca ²⁺	740	37	1837	92	748,5	37,4	1160	58	130	6,5
Mg ²⁺	823	68	2779	229	1132,3	93,1	449,6	37	54,68	4,5
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	1563	97	4616	287	1880,8	116,8	1609,6	95	184,68	11
Na ⁺ + K ⁺	13526	588,3	32733	1424	13337,2	580,1	10221,2	444,4	11782,9	512,3
HCO ₃ ⁻	544	9	717,2	12	292,2	4,8	244	4	189,1	3,1
CO ₃ ²⁻	<0,1	-	<0,1	-	-	-	-	-	-	-
SO ₄ ²⁻	10125	210,8	26611	554	10842,8	225,7	576	12	187,2	3,9
Cl ⁻	16224	457,6	41002	1157	16706,4	471,2	18568,7	523,8	18303	516,3
Fe ³⁺	0,2	0,01	0,92	0,05	0,4	0,02	7,5	0,4	-	-

Fonte: Baseado em Cristaldo et al (2002).

Ambos os poços têm concentrações de SO_4^{2-} superiores a 500 mg.L⁻¹, sendo recomendado < 250 mg.L⁻¹ SO_4^{2-} , e, portanto, devem ter suas águas salgadas tratadas antes de introduzir ao eletrolizador, de forma a evitar inscrustações que interfiram negativamente na transferência de calor, como mencionado no Capítulo 2.

Considerando os resultados apresentados, a localidade de Loma Plata, perto da Lagoa Curacao no Poço 1, foi considerada para a instalação da planta local, dada a menor quantidade de SO_4^{2-} e ao fato de não precisar incorporar NaCl inicialmente.

4.2. Determinação do Volume de Produção da Planta de NaClO

Segundo OEC (2020), a despesa com a importação de NaClO do Paraguai em 2017 foi de US\$ 894.000. Diante da dificuldade de determinar o preço médio de NaClO no mercado internacional no mesmo ano, considerou-se que o preço desse produto no mercado paraguaio seria usado como referência para determinar o volume demandado pelo país anualmente.

A Tabela 4.2 apresenta os preços em função da concentração de NaClO. Pode-se verificar que o preço médio do NaClO de 2,5% comercializado localmente entre 2017 e 2020

não mudou significativamente. Além disso, verifica-se que o preço aumenta com o aumento da concentração de NaClO, o que era de se esperar.

Tabela 4. 2. Preço de hipoclorito de sódio no mercado paraguaio para diversas concentrações

Hipoclorito de Sódio (%)	Preço* (US\$.L ⁻¹)	Fonte
2,5	0,53	(SEDECO, 2017)
2,5	0,53	(STOCK, 2020)
4	0,98	(STOCK, 2020)
6	1,17	(STOCK, 2020)

*1US\$ = 6300 Gs. Cotação em 10/02/2020(BCP, 2020).

Utilizando os dados para extrapolar para concentrações maiores, obteve-se a curva tendencial da Figura 4.1 para diversas concentrações.

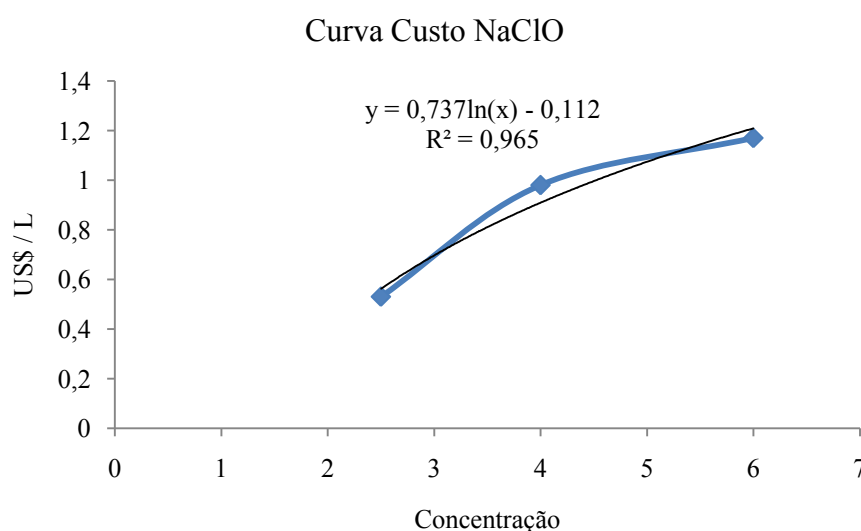


Figura 4. 1. Curva tendencial de preços NaClO no Paraguai

Fonte: Elaboração própria.

Assim, para 15% de concentração de NaClO, o preço no mercado local seria de 1,88 US\$.L⁻¹ e uma produção anual de 475.532 (L) de NaClO (15%) foi considerada adequada para a planta local substituir a importação do país em 2017. Considerando a operação durante 350 dias no ano, a produção média da planta seria de 1.358,67 L.dia⁻¹ ou 40.760 L.mês⁻¹.

Caso deseje-se produzir NaClO à concentração de 12,5%, ao custo de 1,75 US\$.L⁻¹, a planta deveria produzir diariamente 1630,4 L.

À continuação, no Cenário 1, o tempo de funcionamento depende da irradiação solar mínima diária. Dada a irradiação solar histórica no Chaco paraguaio, mostrada na Figura 4.2, de acordo com Franco Leon et al. (2020), o aproveitamento solar ocorre em média durante 4,9 HSP²⁴ por dia durante o ano todo.

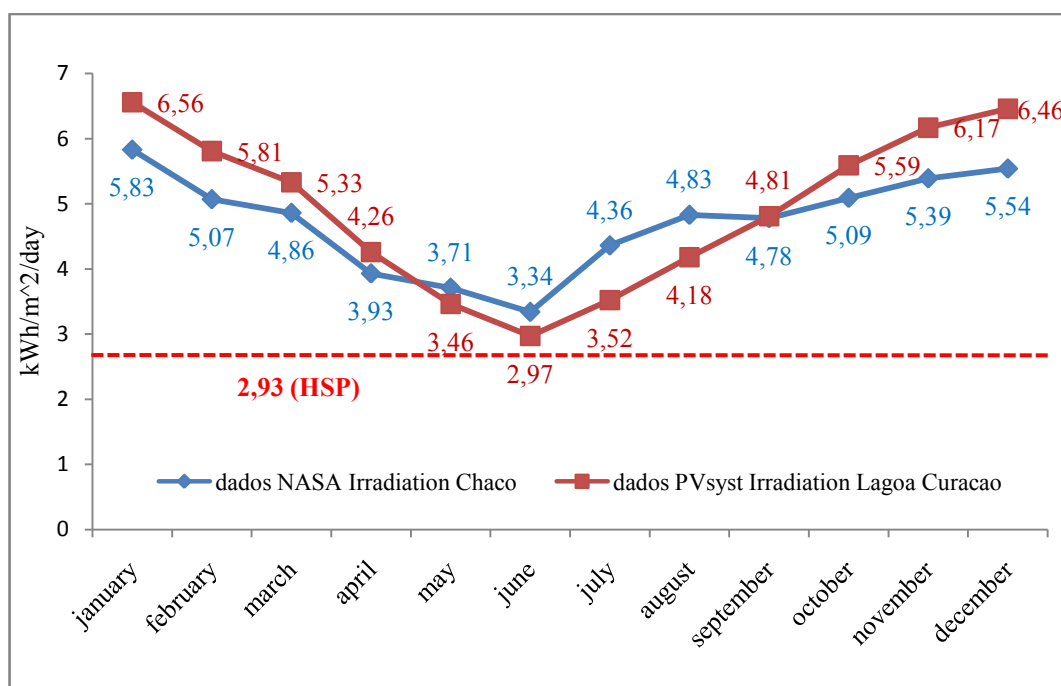


Figura 4. 2. Irradiação solar na região do Chaco paraguaio e na Lagoa Curacao

Fonte: Franco León et al. (2020) & PVsyst (2020).

Para o dimensionamento do SFV, considerou-se o tempo mínimo de 2,93 HSP medido no mês de junho da média mensal histórica da Região, de forma que todos os equipamentos sejam abastecidos durante o ano. A Figura 4.2 mostra, em cor azul, a irradiação direta incidente na superfície inclinada. Na mesma figura, em cor vermelho, também se indica a irradiação solar no local determinado para o poço de água salgada.

Já no Cenário 2, como o suprimento de eletricidade vem da rede de distribuição, o tempo de funcionamento do eletrolisador da planta é maior, como se pode ver no item 4.3.5.

²⁴HSP: Hora Solar Pico, equivalente às horas com irradiação $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$.

4.3. Dimensionamento dos Equipamentos da Planta Local

4.3.1. Tanque saturador de salmoura

Comercialmente há poucos fabricantes de eletrolisadores usados na produção de NaClO, tendo se optado pelos eletrolisadores da serie K da marca Klorigen (KLORIGEN, 2020). De acordo com KLORIGEN (2020), para estes modelos específicos a produção de 1kg de Cl₂ demanda:

- NaCl: 1,65 kg.
- Água: 7,90 L.
- Consumo de energia elétrica: 3,85 kWh, em CA; e 3,65 kWh em CC.
- Custo de manutenção: 0,08 US\$/kg Cl₂, considerando que não é preciso retrolavagem com HCl, conforme menciona o fabricante sobre este modelo.

A Figura 4.3, mostra o esquema de funcionamento do sistema, com o eletrolisador, o módulo de hipoclorito, sistema de tratamento e retificador. De acordo com Da Silva (2014), considerando diferentes marcas de eletrolisador do tipo alcalino, a eficiência média é de 62%. Já segundo o fabricante Klorigen, a eficiência eletroquímica de seus modelos é de 70% a 85%, sendo 70% o valor considerado nesta tese.

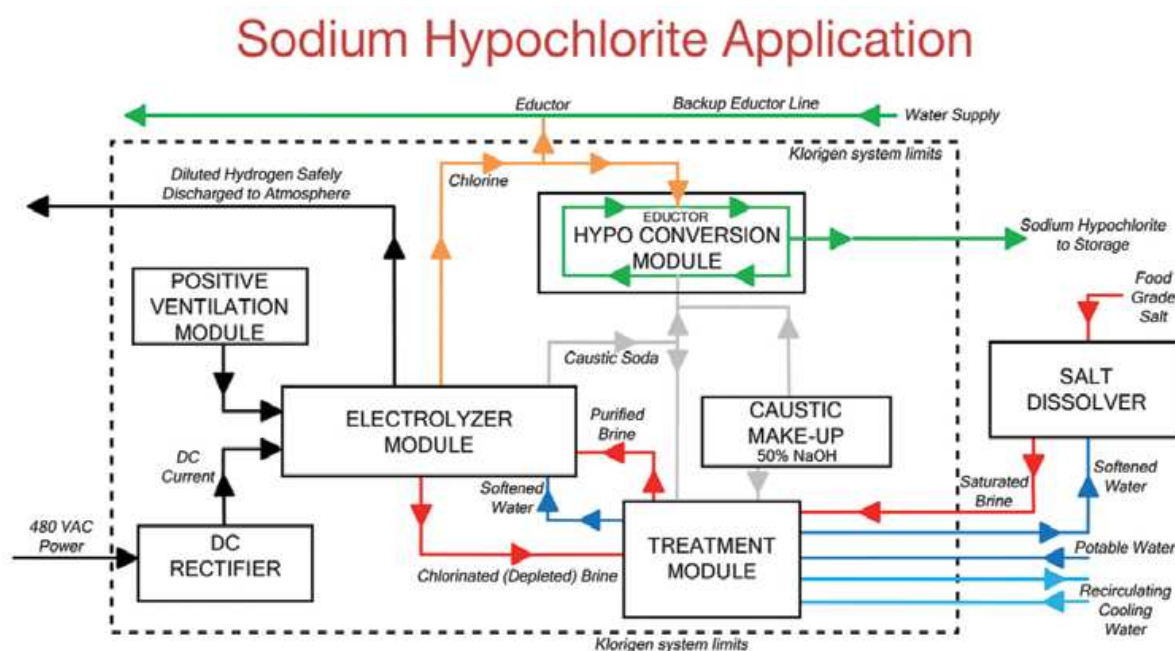


Figura 4. 3. Esquema de funcionamento do Módulo Klorigen

Fonte: Klorigen (2020).

Neste caso, para os eletrolisadores da serie K (KLORIGEN, 2020), a concentração de entrada é:

$$\frac{1,65 \text{ kg NaCl}}{7,9 \text{ L}} = 20,88\%, \text{ para produzir 1 kg de Cl}_2$$

De acordo com a Tabela 2.3, no Capítulo 2, para produzir 3.785,4 L (1.000 gal) de NaClO, com concentração de 15%, são necessários 567,45 kg de Cl₂ (1.251 lb). A produção diária calculada da planta local é 1.358,7 L.dia⁻¹ de NaClO (15%) e, portanto, a vazão mássica de Cl₂ demandada foi:

$$1358,7 \frac{\text{L}}{\text{dia}} \times \frac{567,45 \text{ kg Cl}_2}{3785,4 \text{ L}} = \mathbf{203,67 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} Cl}_2$$

A vazão de água diária (Q_s) para o eletrolisador deve ser:

$$Q_s = 203,67 \frac{\text{kg Cl}_2}{\text{dia}} \times \frac{7,9 \text{ L}}{1 \text{ kg Cl}_2} = \mathbf{1.609 \frac{\text{L}}{\text{dia}}} \text{ (20,88\% NaCl)}$$

Considerando que a água do poço, depois do abrandador, entra no tanque saturador que contém 26,4% NaCl, e sai água com 20,88% NaCl para o eletrolizador a uma vazão de 1.609 L.dia⁻¹, a vazão volumétrica de reposição (Q_p) para o tanque saturador deve ser:

$$Q_p = \frac{26,4\%}{20,88\%} \times 1.609 \frac{\text{L}}{\text{dia}} = \mathbf{2.034,4 \frac{\text{L}}{\text{dia}}}.$$

Por outro lado, a demanda mensal de sal NaCl de reposição para o tanque saturador pôde ser estimada:

$$\frac{26,4\%}{20,88\%} \times \frac{1,65 \text{ kg NaCl}}{1 \text{ kg Cl}_2} \times 203,67 \frac{\text{kg Cl}_2}{\text{dia}} \times 30 \frac{\text{dia}}{\text{mês}} = \mathbf{12.746,93 \text{ kg.mês}^{-1} \text{ NaCl}}.$$

Sabendo que 3% do NaCl vem do poço, isso equivale a:

$$\frac{3\%}{20,88\%} \times \frac{1,65 \text{ kg NaCl}}{1 \text{ kg Cl}_2} \times 203,67 \frac{\text{kg Cl}_2}{\text{dia}} \times 30 \text{ dia} = \mathbf{1.448 \text{ kg.mês}^{-1} \text{ NaCl do poço}}.$$

Portanto, com vazão Q_s, o volume do tanque de salmoura 26,4% NaCl para 30 dias, é **48.270 Litros (12.751,6 gal)**, em material de FRP.

4.3.2. Abrandador de água salgada

O Poço da Lagoa Curacao tem concentração de 740,1 mg.L⁻¹ CaCO₃ e 823,1 mg.L⁻¹ MgCO₃ (Anexo B), o que, de acordo com a Tabela 2.6, classifica sua água como dura (> 180 mg.L⁻¹) e exige o uso de um abrandador de água. Considerando a Equação 3.1 estimou-se a quantidade de grãos de resina por volume para o ajuste da dureza da água.

$$\frac{740,1 \text{ (mg.L}^{-1}\text{CaCO}_3\text{)}}{17,1 \frac{\text{mg.L}^{-1}}{\frac{\text{grão}}{\text{gal}}}} = 43,28 \frac{\text{grãos}}{\text{gal}}$$

$$\frac{823,1 \text{ (mg.L}^{-1}\text{MgCO}_3\text{)}}{17,1 \frac{\text{mg.L}^{-1}}{\frac{\text{grão}}{\text{gal}}}} = 48,13 \frac{\text{grãos}}{\text{gal}}$$

De acordo com Cervantes Anangonó (2015), recomenda-se uma vazão de água de 1.817 L.h⁻¹ (8 gpm), a qual foi utilizada para o dimensionamento posterior das bombas. Este dado está baseado na velocidade espacial ou de reação, que deve estar na faixa de 0,25 a 5 gpm.ft⁻³ resina. Quando o valor não está na faixa mencionada, utiliza-se o valor de 2 gpm.ft⁻³ resina (OWENS, 1995), considerando que quanto menor a velocidade, mais contato haverá da resina com a água a tratar. Neste caso, para o volume de reposição (Q_p) de 2.034,4 L.dia⁻¹ (537,43 gal.dia⁻¹), à vazão de 1.817 L.h⁻¹ (8 gpm), precisaria de 1,12 h.dia⁻¹. A regeneração da resina é feita a cada 9 dias, segundo a recomendação de Cervantes Anangonó (2015).

Pela Equação 3.2 estimou-se a quantidade de resina usada no abrandador de dureza da água.

$$(43,28+48,13) \frac{\text{grão}}{\text{gal}} \rightarrow 91,41 \frac{\text{grão}}{\text{gal}} \times 537,43 \frac{\text{gal}}{\text{dia}} \times 9 \text{ dia} = \mathbf{442.138 \text{ grãos resina}}$$

Para o caso do SO₄⁻² existente, um abrandador com resina do tipo aniônico de base fraca (AMB em inglês) deve ser utilizado (VERLEK, 2019), sendo desejado até 250 mg.L⁻¹ SO₄⁻². Portanto, como no Poço da Lagoa Curacao a concentração é de cerca de 10.125 mg.L⁻¹ SO₄⁻² e ainda considerando o volume de reposição diário (Equação 3.2) estimou-se a quantidade de resina para o ajuste de SO₄⁻².

$$\frac{10.125 \text{ (mg.L}^{-1}\text{SO}_4\text{)}}{250 \frac{\text{mg.L}^{-1}}{\frac{\text{grão}}{\text{gal}}}} = 40,5 \frac{\text{grãos}}{\text{gal}}$$

$$40,5 \frac{\text{grão}}{\text{gal}} \times 537,43 \frac{\text{gal}}{\text{dia}} \times 9 \text{ dia} = \mathbf{195.893} \text{ grãos resina}$$

O método de regeneração em linha foi adotado para facilitar a vazão de um regenerante ao outro, sendo necessários dois tanques abrandadores. O sal do tanque de salmoura foi utilizado para o primeiro abrandador, enquanto o segundo abrandador utilizou NaOH para tratamento da resina.

Neste caso, o abrandador modelo comercial S-451C (ACS, 2020) foi escolhido para tratar adureza. A Tabela 4.3 mostra os modelos comerciais e suas características indicadas pelo fabricante. A capacidade máxima do abrandador de salmoura é de 450.000 grãos e 15 ft³. Já para o abrandador de sulfato, o modelo S-301B foi escolhido, de 300.000 grãos e 10 ft³. Os tanques têm um revestimento interno de polietileno de alta densidade termofundido e um acabamento externo de epóxi, com garantia de até 10 anos. A Figura 4.4, mostra um conjunto de abrandadores de água da Marca ACS.

Tabela 4. 3. Modelo comercial do abrandador de água - ACS

MODELO	CAPACIDAD MÁX. GRANOS	FLUJO (gpm) Cont Máx	TANQUE (pulg)	RESINA (ft ³)	TUBERÍA (pulg)	CAPACIDAD TANQUE SAL (lbs)
S-31A	30,000	8 10	9X48	1	1	450
S-61A	60,000	10 20	12X62	2	1	450
S-91A	90,000	15 24	14X65	3	1	450
S-121B	120,000	32 48	17X58	4	1 ½	450
S-151B	150,000	38 52	17X72	5	1 ½	450
S-301B	300,000	64 96	24X71	10	1 ½	1000
S-451C	450,000	87 118	30X72	15	2	1500
S-601C	600,000	94 125	36X72	20	2	2500

Fonte: ACS (2020).



Figura 4. 4. Abrandador de água

Fonte:ACS (2020).

De acordo com Ingenieríaquímica.org (2011), o preço de um abrandador de 1,5 ft³ está em torno de 660 US\$; e de 2 ft³ de resina, 748 US\$. No site da Amazon (2020), o preço está cotado em 463,4 US\$ para 1 ft³ e 522,4 US\$ para 2 ft³.

Como mencionado no Capítulo 3, para o abrandador com salmoura são necessários 1,36 kg de NaCl para cada 3,7854 L de água (3 lb NaCl por 1 gal água) (ROHN & HASS, 1988). Ou seja, com 5,44 kg (12 lb) de NaCl por ft³ de resina, serão demandados 15,14 L (4 gal) de água. Neste caso, para os 0,4247 m³ (15 ft³) do abrandador maior serão necessários 227,125 L (60 gal) de água.

Utilizando a Equação 3.3 estimou-se a quantidade de água no abrandador considerando as concentrações finais no tanque saturador e no abrandador. Substituindo os dados, obteve-se:

$$227,125 \text{ L} \times 26,4\% = V_w \times 10\%$$

$$V_w = 597 \text{ L}$$

Portanto, para 0,028m³ (1 ft³) teve-se:

$$28 \frac{\text{L}}{\text{BV}} \times 2 \frac{\text{BV}}{\text{h}} = 56 \frac{\text{L}}{\text{h}} (14,8 \frac{\text{gal}}{\text{h}})$$

O tempo de contato (t_c) foi obtido pela Equação 3.4 e, assim, a vazão de entrada da salmoura regenerante no abrandador (Q_{rg}) também foi estimado (Equação 3.5).

$$t_c = \frac{V_w}{V_a \cdot 56} = \frac{597 \text{ L}}{840 \frac{\text{L}}{\text{h}}} = 0,71 \text{ h} = 42,6 \text{ min}$$

$$Q_{rg} = \frac{V_w}{t_c} = \frac{597 \text{ L}}{0,71 \text{ h}} = 840 \text{ L.h}^{-1} \left(3,7 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \right)$$

De acordo com Black & Veatch (2010) o processo completo tarda em média 90 minutos.

Como mencionado anteriormente, de acordo com Valencia & Rodriguez (2008), para a regeneração da resina fraca com NaOH o consumo de soda cáustica deve estar entre 50 a 60 kg de NaOH a 100% para cada 1m^3 ($35,3 \text{ ft}^3$) de resina aniônica forte, dado utilizado para dimensionar a resina fraca mas usado em menor quantidade (VERLEK, 2019). Para regenerar 1ft^3 de resina demandou-se:

$$\frac{50 \text{ kg NaOH}}{35,3 \text{ ft}^3} = 1,41 \text{ kg NaOH}$$

Portanto, para um abrandador de 10 ft^3 com regeneração ocorrendo 3 vezes ao mês, seria necessário 42,3 kg de soda cáustica por mês.

$$10 \times 3 \times 1,41 \text{ kg NaOH} = 42,3 \text{ kg.mês}^{-1} \text{ NaOH}$$

4.3.3. Aquecedor de água

A temperatura do ar mínima na média histórica em Loma Plata no mês de julho é $13,1^\circ\text{C}$, de acordo com DMH (2019) e CLIMATE-DATA (2020). Durante a extração da água no Poco 1, realizada em estudo de Cristaldo et al. (2002), visto no Anexo A, no mês de agosto de 2002 a temperatura da água do poço foi de $26,7^\circ\text{C}$. Portanto, sendo necessário uma temperatura $> 10^\circ\text{C}$, o sistema não precisa de um aquecedor nos meses de frio.

4.3.4. Chiller ou resfriador de água

A temperatura média histórica do ar na localidade de estudo tem uma máxima de $35,6^\circ\text{C}$ em janeiro e dezembro (DMH, 2019; CLIMATE-DATA, 2020). Nelson et al. (1999) fizeram

um estudo à temperatura ambiente de 32 °C, que mostrou como é afetada a estratificação²⁵ da temperatura da água em *chillers*, em tanques de fibra de vidro, entre a parte de cima mais quente e a parte baixa mais fria do tanque. Ayala et al. (2014), em condições similares de temperaturas máximas entre 30°C e 35°C, mostrou que a temperatura num tanque de PEAD similar à temperatura da água na superfície interna do tanque atingiu 38°C, sendo 31°C no fundo do tanque num dia de sol no verão. A parte inferior é a que está disponível normalmente para descarregar. Como para temperaturas > 26,7°C pode-se afetar o funcionamento das células eletrolíticas, precisou-se dimensionar um *chiller* para baixar à temperatura ideal de 18,75° C. Para tal, considerou-se a máxima temperatura de 38°C.

$$D_{ch}=1,2 \times 1.817 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 1 \frac{\text{kcal}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}} \times (38-18,75)^{\circ}\text{C} = \mathbf{41.972,7 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}$$

Neste caso, um *chiller* compacto da Marca Mecalor, modelo MSA-45 (MECALOR, 2020), pode refrigerar 43.600 kcal.h⁻¹, com a temperatura da água entre 5 a 25°C. A potência de consumo nominal dele é 17,6 kW, com bomba de processo de 16,4 m³.h⁻¹ (164.000 L.h⁻¹) (maior que o caudal (Q_s) de 1.609 L.dia⁻¹ estimado anteriormente). O consumo de energia elétrica foi estimado em:

$$\frac{17,6 \text{ kW}}{16,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \mathbf{1,0731 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}}$$

4.3.5. Eletrolisador

Considerando o Cl₂ produzido, o eletrolisador alcalino com NaOH como eletrólito da marca *Klorigen Modelo K-Serie* foi escolhido (KLORIGEN, 2020). Os modelos da *K-série*, apresentados na Tabela 4.4, permitem obter concentrações de hipoclorito de 12,5% ou 15% e 565 a 18.000 kg.dia⁻¹ de Cl₂, além de terem a vantagem de serem modulares. A tensão utilizada em CA é de 480 V, sendo retificada para CC no retificador²⁶.

²⁵Estratificação da água devido ao aquecimento das camadas superficiais em relação às profundas, ou seja, o sol aquece a camada superior do corpo de água, causando a formação de camadas de água de diferentes temperaturas e densidades ao longo da coluna d'água.

²⁶ O retificador permite controlar a tensão de entrada no eletrolisador. Podendo ser controlado a corrente de acordo com a produção necessária. O H₂ armazenado junto com a CaC podem servir de backup caso precise a planta durante a produção.

Tabela 4. 4. Modelos de eletrolisadores para dimensionamento de planta local de NaClO.

Fabricante	País	Modelo	Tipo	Produção Cl ₂ (kg.dia ⁻¹)	Concentração	
					15%	12,5%
					NaOH (L.dia ⁻¹)	NaClO (L.dia ⁻¹)
Klorigen ^a	E.U.A.	K-4 Module	Alcalino NaOH	565	3650	4750
Klorigen	E.U.A.	K-8 Module	Alcalino NaOH	1125	7300	9500
Klorigen	E.U.A.	K-16 Module	Alcalino NaOH	2250	14600	19000
Klorigen	E.U.A.	2 x K-16 Module	Alcalino NaOH	4500	29200	38000
Klorigen	E.U.A.	4 x K-16 Module	Alcalino NaOH	9000	58400	76000
Klorigen	E.U.A.	8 x K-16 Module	Alcalino NaOH	18000	116800	152000
Fabricante	País	Modelo	Tipo	Produção NaClO (kg.dia ⁻¹) (FAC)*	Energia kW-hr/kg (FAC) ²⁷	
MIOX ^b	E.U.A.	RIO HYPO H1	Alcalino NaOH	45	4,4	
MIOX ^b	E.U.A.	RIO HYPO H2	Alcalino NaOH	90	4,4	
MIOX ^b	E.U.A.	RIO HYPO H3	Alcalino NaOH	135	4,4	
MIOX ^b	E.U.A.	RIO HYPO H4	Alcalino NaOH	180	4,4	
MIOX ^b	E.U.A.	RIO HYPO H5	Alcalino NaOH	225	4,4	

Fonte: (Klorigen, 2020)^a & (MIOX, 2020)^b.

Para o Cenário 1, o Eletrolizador K-16 Module é adequado, dado que pode produzir:

$$\frac{2250}{24} = 93,75 \text{ kg.h}^{-1}\text{Cl}_2$$

No caso da planta projetada e do tempo de irradiação mínimo considerado na região, a produção horária de Cl₂ seria:

$$\frac{203,67}{2,93} = 69,51 \text{ kg.h}^{-1}\text{Cl}_2$$

Portanto, pode produzir em 2,17 horas de funcionamento.

²⁷ FAC: Free active chlorine , em inglês. (*) concentração (FAC) = 8000 mg.L⁻¹

Para o Cenário 2, o Eletrolisador K-4 Module encontra-se na faixa adequada para esse volume de produção da planta de $1358,7 \text{ L.dia}^{-1}$ (à 15% de concentração) ou o equivalente de $1.630,4 \text{ L.dia}^{-1}$ (à 12,5% de concentração), de acordo com a Tabela 4.4. Sendo capaz de produzir:

$$\frac{565}{24} = 23,54 \text{ kg.h}^{-1}\text{Cl}_2$$

Portanto, pode produzir a demanda de cloro em:

$$\frac{203,67 \text{ kgCl}_2}{23,54 \frac{\text{kg Cl}_2}{\text{h}}} = 8,65 \text{ h}$$

Assim, para o Cenário 2 o tempo de funcionamento da planta é de 8,65 h.

Sendo produzidos $203,67 \text{ kgCl}_2.\text{dia}^{-1}$, o consumo do eletrolisador por kgCl_2 produzido é 3,85 kWh em CA, com eficiência de 70% a 85% segundo Klorigen (2020).

$$203,67 \frac{\text{kgCl}_2}{\text{dia}} \times 3,85 \frac{\text{kWh}}{\text{kgCl}_2} = 784,12 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \text{ em CA}$$

Portanto, considerando a maior demanda de eletricidade na operação, ou seja, com eficiência de 70%, o eletrolisador demandaria cerca de $1120 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$.

4.3.6. Ventilador e tanque de NaClO

Para armazenar NaClO por 3 dias, com produção diária $1358,7 \text{ L.dia}^{-1}$ de NaClO a 15%, torna-se necessário um tanque em FRP com capacidade de:

$$1358,7 \frac{\text{L}}{\text{dia}} \times 3 \text{ dia} = 4076 \text{ L NaClO (a 15\%)}$$

Considerando a proporção mássica entre Cl_2 e H_2 produzidos de 1:0,03 (1 kg Cl_2 produzido para 0,03 kg H_2 produzido), assim como as condições de segurança para ventilar eventuais vazões de H_2 indesejadas, pelas Equações 3.6 e 3.7 foi possível estimar a vazão molar diária de H_2 e de ar, respectivamente.

$$\text{Cl}_2 \text{ produzido} = 203,67 \text{ kg.dia}^{-1}$$

$$P_{H_2} = 0,03 \times 203,67 \frac{\text{kg Cl}_2}{\text{dia}} = \mathbf{6,11 \frac{\text{kg H}_2}{\text{dia}}} \quad (13,47 \frac{\text{lbH}_2}{\text{dia}})$$

$$\text{Ventilação de H}_2 \rightarrow 0,01 \times 6,11 \frac{\text{kgH}_2}{\text{dia}} = 0,0611 \frac{\text{kgH}_2}{\text{dia}} (0,1347 \frac{\text{lbH}_2}{\text{dia}})$$

$$M_{H_2} \left(\frac{\text{lb.mol H}_2}{\text{dia}} \right) = \frac{0,1347 \left(\frac{\text{lbH}_2}{\text{dia}} \right)}{2,01596 \frac{\text{lb H}_2}{\text{lb-mol H}_2}} = 0,0668 \left(\frac{\text{lb-mol H}_2}{\text{dia}} \right);$$

$$M_{\text{ar}} \left(\frac{\text{lb.mol ar}}{\text{dia}} \right) = 0,0668 \left(\frac{\text{lb.mol H}_2}{\text{dia}} \right) \times \frac{1 \text{ ar}}{0,01 \text{ H}_2} \times 4 = 26,72 \left(\frac{\text{lb.mol ar}}{\text{dia}} \right)$$

Ao final, pela Equação 3.8 foi possível estimar a vazão mássica de ar necessária para retirar o H₂ que tenha escapado, utilizando sopradores e garantindo a segurança da operação.

$$Q_{\text{ar}} \left(\frac{\text{ft}^3 \text{ ar}}{\text{min}} \right) = \left[26,72 \left(\frac{\text{lb.mol ar}}{\text{min}} \right) \times (77^\circ\text{F} + 460^\circ\text{F}) \times \left(10,73 \frac{\text{ft}^3 \cdot \text{psia}}{\text{lb.mol} \cdot ^\circ\text{R}} \right) \right] / 14,7 (\text{psia})$$

$$Q_{\text{ar}} = 10.473,5 \left(\frac{\text{ft}^3}{\text{min}} \right) = \mathbf{17.794,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}$$

Para a estimativa da demanda de energia elétrica desses ventiladores, Black & Veatch Corporation (2010) mencionaram a necessidade de determinar inicialmente a velocidade do ar, conforme citado no Capítulo 2. Na ausência de dados da área da seção do tubo de descarga (OA), os mesmos autores recomendaram que a velocidade do ar na descarga seja menor que 5.946,5 m³.h⁻¹ (3500 ft.min⁻¹). Portanto, para a vazão de ar de 17.794,6 m³.h⁻¹ (10.473,5 ft³.min⁻¹), a seção OA ideal é de 0,278 m² (3 ft²).

Como mencionado no Capítulo 2, a pressão total associada ao escoamento do ar (AHP) corresponde ao somatório da pressão de velocidade (VP, em inH₂O²⁸ e seu equivalente em Pa) e da pressão estática (SP, também em inH₂O). Pela Equação 2.16 estimou-se VP a partir da velocidade assumida de 5946,5 m³.h⁻¹ (3500 ft.min⁻¹).

$$VP = (3500 / 4005)^2 = 0,7637 \text{ inH}_2\text{O} (190 \text{ Pa})$$

Segundo Severn Trent Services (2007) e Black & Veatch (2010), a pressão estática dos dutos deve ser menor que 2 inH₂O acima da atmosférica.

²⁸inH₂O: definida como a pressão exercida por uma coluna de água de 1 polegada de altura em condições de temperatura d'água de 4 °C. 1 inH₂O = 248,84 Pa.

Pela Equação 2.15 estimou-se a potência que deve ser entregue pelo ventilador para o escoamento do ar (AHP).

$$\text{AHP} = (10473,5 \times 2) / 6356 = \mathbf{3,3 \text{ (HP)}}$$

Considerando que a eficiência do motor elétrico que aciona o ventilador é 84,5% (WEG,2020), a potência do motor elétrico do ventilador estimada foi **2,9 kW**.

4.3.7. Bombas de água e alimentação

A seleção da bomba de água para o tanque saturador considerou a vazão de reposição do tanque saturador ($2034,4 \text{ L.dia}^{-1}$); a vazão contínua de água macia 1817 L.h^{-1} (8 gpm); o tempo de funcionamento do sistema de bombeamento (1,12 h); e a profundidade do poço (30 metros), que corresponde a maior profundidade com dados registrados de perfuração no Anexo C. Assim, a bomba selecionada foi da marca Grunfos, modelo SP 3A-6, submergível, com vazão de $2316,67 \text{ L.h}^{-1}$ (10,2 gpm), com sensores para ajuste de vazão; potência de 0,37 kW e consumo elétrico de $0,2733 \text{ kWh.m}^{-3}$ ($1813 \text{ kWh.ano}^{-1}$), segundo Lenntech (2020) e Grundfos (2020).

A bomba de água para reservatório deve garantir a vazão de água salgada do poço, a 3% NaCl, para o reservatório de sal solar. A planta demanda uma vazão volumétrica de $12.746,93 \text{ kg de NaCl.mês}^{-1}$, que à 3% de concentração resulta em uma demanda de água de $13,57 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, bombeada do poço à profundidade de 30 metros. O equipamento selecionado foi o módulo SMP-200 IP65 Atersa, também da marca Grundfos, com motor trifásico (220 V_{AC}) de potência 2 kW, adaptável ao sistema solar fotovoltaico, com 2 linhas de entrada para os painéis no módulo.

Como mostra a Figura 4.5, para uma altura manométrica de 30 m e irradiação solar de $4 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, um sistema com 1800 Wp em painéis solares fotovoltaicos pode bombear $20 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. Assim, para a planta projetada 1 bomba atende à demanda de água, de acordo com Atersa (2011). Mesmo considerando o tempo mínimo de 2,93 h, na projeção da curva de 30 m atinge uma vazão de $15 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. Aliás, o SFV dimensionado considerou um excedente de geração de energia para atender à demanda da bomba do reservatório, caso necessário.

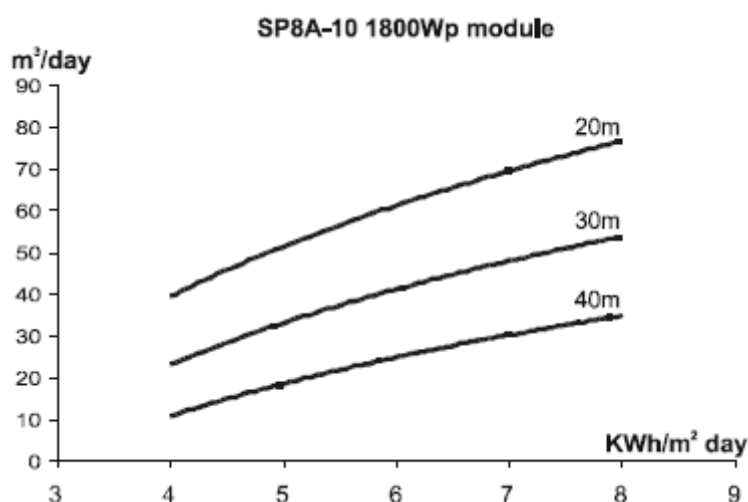


Figura 4. 5. Dados de operação do modelo Atersa SMP-200 em função da irradiação solar, altura de bombeamento para sistemas fotovoltaicos de 1800 Wp.

Fonte: Atersa (2011).

Em seguida foram dimensionados os medidores-dosadores. Neste caso, o fabricante Klorigen fornece o volume demandado pelo eletrolisador (7,9 L por cada 1 kgCl₂). Portanto, no Cenário 1 para produzir 69,51 kg.h⁻¹Cl₂ foi necessário bombear:

$$(7,9 \times 69,51) \text{ L.h}^{-1} = 549,14 \text{ L.h}^{-1} \text{ (2,41 gpm)}$$

Para o Cenário 2, uma produção de 23,54 kg.h⁻¹Cl₂ exigiu uma bomba de dosagem de:

$$(7,9 \times 23,54) \text{ L.h}^{-1} = 186 \text{ L.h}^{-1} \text{ (0,82 gpm)}.$$

A bomba dosadora selecionada para ambos cenários também é da marca Grundfos, porém do modelo CRE 1-2. Essa bomba multietapa é usada em sistemas de tratamento de água, com vazão real de até 1473 L.h⁻¹, sendo adequada em virtude de a vazão de dosagem dos dois cenários ser 549,14 L.h⁻¹ e 186 L.h⁻¹ respectivamente. O motor síncrono de 3 fases, de **0,37 kW** de potência, leva ao consumo elétrico de 179 kWh.ano⁻¹ (Grundfos, 2020).

Por fim, a bomba de alimentação de NaClO para o carregamento do tanque de armazenamento aos caminhões deve considerar a vazão > 3,7854 L (1 gpm) utilizada para o escoamento de fluidos (BLACK & VEATCH, 2010). Portanto, a bomba pode transportar os 4.076 L armazenados no tanque em 2,93 h, ou em vazão menor durante até 8,65 horas de funcionamento da planta. Considerando a maior vazão da planta, a vazão bombeada seria de:

$$\frac{4076 \text{ L}}{2,93 \text{ h}} = 1391 \frac{\text{L}}{\text{Hora}},$$

Assim, a bomba selecionada foi novamente a CRE 1-2 (Grundfos, 2020).

4.3.8. Reservatório externo

Como mencionado, o sal solar é um insumo que dadas as condições ambientais locais, pode ser obtido por meio de evaporação de água salgada. No caso do Chaco, de acordo com Harder (2017), o histórico de precipitação entre os anos 1932 e 2015 (média de 0,806 m.ano⁻¹) e evaporação (média de 1,699 m.ano⁻¹) mostra que é viável aplicar este método para obtenção de sal solar, dada que a diferença entre esses regimes é maior do que 0,7 m.ano⁻¹.

Por outro lado, em processos posteriores a planta pode fazer uso da recirculação no tanque de salmoura para manter os níveis de concentração desejados. Estes dados mostram o real potencial que tem como fonte de água salgada da planta.

Finalmente, pela Equação 3.9, a área do reservatório de evaporação de sal solar para atender a produção da planta local deve levar em conta a vazão volumétrica de 13,57 m³.dia⁻¹ de água bombeada do poço (equivalente a 407,1 m³.mês⁻¹) e a diferença entre a taxa de evaporação de água e de precipitação (0,9 m.ano⁻¹ ou 0,075 m.mes⁻¹).

$$A_{\text{res}} = \frac{Q_{\text{ag}}}{T_{\text{evap}} - T_{\text{prec}}} = \frac{407,1}{0,075} = 5428 \text{ m}^2 = 0,54 \text{ ha}$$

Para a estimativa do custo do reservatório, a Figura 4.6 mostra a ponderação a partir da taxa de evaporação da água e da vazão diária de descarga da salmoura. Aproximando a curva da taxa de evaporação de 2 m.ano⁻¹ da linearidade e considerando ser esse um valor próximo da taxa de evaporação anual no Chaco, o custo de construção do reservatório para uma descarga de salmoura de 2.000 m³.dia⁻¹ é de 6.000.000 US\$. Extrapolando de forma linear para a vazão diária estimada na tese (13,57 m³.dia⁻¹), o custo proporcional seria de 40.710 US\$.

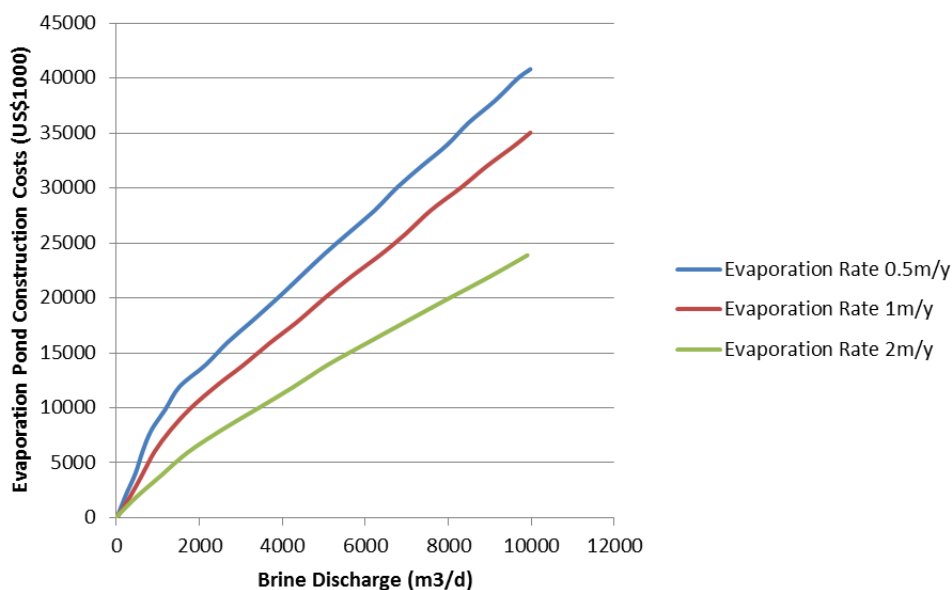


Figura 4. 6. Custo de construção do reservatório de evaporação de sal solar para diversas taxas de evaporação de água.

Fonte: Lenntech (2020).

O custo da terra na região do Chaco está em torno a 600 US\$.ha⁻¹ em áreas produtivas (EL PAIS, 2018) e na média 400 US\$.ha⁻¹ na região. Dependendo da utilidade, além do reservatório de evaporação, uma extensão de 3 ha considerando toda a infraestrutura, tem um custo baixo (1800 US\$) em comparação com a planta com um todo. Além disso, caso uma planta modelo, como a proposta nesta tese, seja implantada numa localidade, dada a importância para a comunidade, poderia ser solicitada a doação da área em benefício público.

4.3.9. Sistema de armazenamento de H₂

Para o armazenamento do hidrogênio optou-se pela compressão à 30 bar, suficiente para garantir o armazenamento a um consumo energético razoável. A Tabela 4.5 mostra as características gerais do tanque de armazenamento da marca ELT Elektrolyse Technik, também utilizado por Espínola (2013).

Tabela 4. 5. Tanque de armazenamento da ELT Elektrolyse Technik

Tanque de Armazenamento	
Volume hidráulico	110 m ³
Pressão Max.	30 bar
Volume máximo hidrogênio	2.993 m ³

Fonte: Espínola (2013).

Considerando a produção diária de H₂ da planta, a massa específica do gás ($0,0899 \frac{\text{kgH}_2}{\text{m}^3}$) e a sua adequação como gás real (com fator de compressibilidade de 1,032 adotado para a pressão de 30 bar), segundo AEH2 (2020), o armazenamento de H₂ no tanque seria de $2,338 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, confirmando a seleção adequada do modelo mencionado.

$$\frac{6,11 \frac{\text{kgH}_2}{\text{dia}}}{0,0899 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3}} = 67,96 \frac{\text{Nm}^3}{\text{dia}}$$

$$\text{Para 30 bar} \rightarrow \frac{67,96 \frac{\text{Nm}^3}{\text{dia}}}{30} \times 1,032 = \mathbf{2,338 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}}$$

Para o Cenário 1, como estimado anteriormente, o tempo de funcionamento da planta seria de 2,93h. Nesse período o H₂ diário produzido seria:

$$\frac{67,96 \text{ Nm}^3}{2,93 \text{ h}} = 23,19 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Por outro lado, para o Cenário 2, o tempo de produção diário estimado seria de 8,65 horas, o que permitiria produzir H₂ à razão de:

$$(67,96 \text{ Nm}^3 / 8,65 \text{ h}) = 7,856 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Estes valores foram adotados no dimensionamento do custo unitário da planta, posteriormente apresentado.

Em condições padrão (à 25°C), a capacidade de cada tanque de armazenamento seria de 2.933 m^3 ou 264 kg. Ou seja, o tanque pode armazenar o H₂ produzido diariamente neste tempo durante 44 dias.

$$\frac{2993 \text{ m}^3}{67,96 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}} \approx 44 \text{ dias}$$

De acordo a Espínola (2013) e Furlan (2012), o preço unitário considerado do tanque de armazenamento seria $257,35 \text{ US}\$. \text{kg}^{-1}$, valor esse que pode ser considerado para o cálculo econômico posterior.

Quanto ao compressor, foi escolhido o modelo de dois estágios PDC-3-300-600, da marca PDC Machines, visto na Figura 4.3. A Tabela 4.6 mostra as especificações básicas informadas pelo fabricante.



Figura 4. 3. Compressor de diafragma Modelo PDC-3-300-600

Fonte: PDC Machines (2020).

Tabela 4. 6. Especificações do compressor de diafragma PDC-3-300-600

Compressor PDC-3-300-600	
Pressão de descarga	30 bar (435 psi)
Vazão	8 Nm ³ h ⁻¹
Motor	7,5 kW (10 HP)

Fonte: PDC Machines (2020).

O tempo de compressão foi estimado considerando a vazão diária de H₂ e a vazão especificada do compressor, sendo neste caso o tempo de 8,5 h.dia⁻¹ por compressor. Nestas condições no Cenário 1, cada compressor comprime:

$$8 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 2,93 \text{ h} = 23,44 \text{ Nm}^3$$

Ou seja, seriam demandados 3 compressores no Cenário 1, como se verifica a seguir.

$$\frac{67,96}{23,44} = 2,89 \text{ compressor}$$

Já no Cenário 2, seria preciso somente um compressor.

4.3.10. Célula a combustível (CaC)

Para o caso desta tese, foi adotada a CaC do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), do tipo conjunto de eletrodos de membrana (MEA) feitos com PtCo num carbono de alta área superficial (PtCo/HSC-e) no catalisador de cátodo; catalisador de ânodo de Pt/C e uma Membrana PFSA reforçada com 14 microns. A eficiência do sistema deste tipo é de 52%, e seu custo estimado, para fins de dimensionamento orçamentário do tipo PEM, de 1800 \$.kW⁻¹ em 2017 (SAITO, 2018).

O dimensionamento de consumo de energia elétrica dos equipamentos da planta local, mostrado na Tabela 4.7, lista os equipamentos usados na planta de produção de NaClO e seus respectivos consumos energéticos. Para o Cenário 1, os três compressores totalizariam um consumo de 1.327 kWh.dia⁻¹ (39.809 kWh.mês⁻¹). Já no Cenário 2, o único compressor totaliza um consumo de 1.199,4 kWh.dia⁻¹ (35.989 kWh.mês⁻¹).

Tabela 4. 7. Consumo de energia elétrica estimado da planta local de NaClO

Equipamento	Consumo (kWh.dia ⁻¹ /ano ⁻¹)	Potência (kW)	Eficiência (%)
Eletrolisador	1120 $\frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$	(ver) ²⁹	70%
Bomba dosadora	179 $\frac{\text{kWh}}{\text{ano}}$; 0,51 $\frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$	0,37 kW	-
Bomba tanque saturador	1813 $\frac{\text{kWh}}{\text{ano}}$; 4,97 $\frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$	0,37 kW	-
Bomba p/ reservatório	4 $\frac{\text{h}}{\text{dia}}$; 8 $\frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$	2 kW	-
Bomba alimentador	179 $\frac{\text{kWh}}{\text{ano}}$; 0,51 $\frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$	0,37 kW	-
Chiller	1,0731 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times 1,609 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 1,727 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$	17,6 kW	-
Soprador	n.a.	2,8 kW	84,5%
Compressor	7,5 kW $\times 8,5 \frac{\text{h}}{\text{dia}} = 63,75 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$	7,5 kW	-

4.3.11. Sistema solar fotovoltaico (SFV)

No Cenário 1, o eletrolisador demandaria diariamente de 382,3 kW, sendo a demanda total diária da planta de 428,33 kW.

Para detalhar de forma mais precisa o SFV, utilizou-se o software PVsyst 7.0 (PVSYST, 2020) para dimensionar os módulos e inversores. Como já mencionado, o software permite dimensionar e simular a produção de energia a partir de bases de dados de irradiação,

²⁹A potência no eletrolisador para cada cenário é determinada pelo consumo na Tabela 4.7. Por outro lado, no dimensionamento do SFV, o tempo de irradiação solar diário mínimo é considerado (ver o valor calculado para o Cenário 1), (FRANCO LEON et al., 2020).

como da NASA e de Meteonorm, e considerando um período de funcionamento de 25 anos e degradação dos painéis em 0,6% ao ano (SUNPOWER, 2019). Neste caso, sabendo a localização geográfica do poço, pode ser determinado com maior precisão as características do SFV.

A partir deste detalhamento, foi possível também determinar os custos econômicos do SFV no Cenário 1. Considerou-se também neste cálculo os custos de O&M do sistema e de mão de obra para sua instalação local.

Quanto aos preços dos componentes, estimou-se o custo do sistema instalado considerando a pesquisa de preço do inversor e do módulo SFV, tendo sido encontrado: o índice de preços do inversor ($0,2 \text{ US}\$.W^{-1}$) segundo Wood Mackenzie and SEIA (2019); e o módulo SFV ($0,5 \text{ US}\$.W^{-1}$) segundo SPV Market Research (2019). Isto resultou no custo de instalação em média $2,4 \text{ US}\$.W^{-1}$ em 2018, para uso não residencial entre 250 e 500 kW, (BERKELEY LAB., 2019). De acordo com Ramadam & Elistratov (2019), os custos médios de O&M de sistemas fotovoltaicos na faixa de 100 a 1000 kW seria de $20 \text{ US}\$.kW^{-1}$ (NREL, 2016) e de mão de obra de $13,5 \text{ US}\$.kW^{-1}$.

A Tabela 4.8 mostra as características do sistema dimensionado, os quais encontram-se no Anexo E da tese. Neste mesmo anexo estão descritos os resultados da simulação que incluem: tipo de módulos, inversores, produção e eficiências do sistema, assim como as figuras e tabelas resultantes.

Tabela 4. 8. Sistema fotovoltaico da planta local com PVsyst

Sistema Fotovoltaico 509kWp - Loma Plata, PY			
Equipamento	Marca/modelo	Quantidade	Total
Módulo	Sunpower/SPR-E19-410-COM	9 série x 138 paralelo	1242 painéis
Inversor	ABB/PVS-100-TL	5 x 100 kW	500 kW
PR (performance média)		81,59%	
Potência instalada		509 kW _p	
Potência máxima		494 kW _{dc}	
Potência nominal		500 kW _{ac}	
Produção energia		801,8 MWh.ano ⁻¹	
Superfície módulos		2685 m ²	
Angulo inclinação fixo (Tilt angle)		25°	
Localização geográfica		Latitude -22.49°S Longitude -59.83°W	

Fonte: PVsyst (2020).

Neste caso, o modelo utilizado no PVsyst foi o *Grid-Connected System*, de forma a alimentar o eletrolisador e equipamentos, resultando numa instalação de 509 kWp obtida das simulações, valor esse maior que a capacidade de 428,33 kW calculados previamente. Em função da maior precisão de dados, optou-se por proceder às estimativas econômicas com o resultado do PVsyst. Como referência de simulações, os trabalhos de Ramadan & Elistratov (2019) e Hafez et al. (2019) mostram modelos comerciais de módulos e inversores que se encontram na base de dados do programa para sistemas SFV, considerados nesta tese.

4.4. Estimativa dos Custos dos Cenários de Funcionamento

A Tabela 4.9 lista os equipamentos e insumos usados no Cenário 1 e seus respectivos custos. Já a Tabela 4.10 elenca os equipamentos, insumos e respectivos custos associados ao Cenário 2. Para o Cenário 2, considerou-se uma instalação elétrica de distribuição da subestação local mais próxima com um custo modular de 27,39 US\$.m⁻¹ (FRANCO LEON, 2008), sendo a distância da subestação de Loma Plata de 14 km até a Lagoa Curacao (Google Maps, 2020). Neste caso, substituiu-se o SFV de 509 kWp, incluindo o inversor, por um sistema elétrico em MT (23 kV) com transformador e retificador.

Tabela 4. 9. Cenário 1 – equipamentos & insumos da planta

Equipamento	Quantidade	Custo	Cálculo	Fonte
Bombareservatório/50 m	13,57m ³	530 \$.m ⁻³	$13,57 \times 530 \frac{\$}{m^3} = 7192,1 \$$	(SEINETECH, 2010)
Bomba tanque saturador /50 m	2,034m ³	530 \$.m ⁻³	$2,034m^3 \times 530 \frac{\$}{m^3} = 1078 \$$	(SEINETECH, 2010)
Abrandador água	(15 +10)ft ³	463,4–660 \$.ft ⁻³ resina	660 S.ft⁻³ (máximo valor)	(AMAZON, 2020); (INGENIERIAQUIMICA.COM, 2011)
Tanque salmoura (FRP)	48270 Litros	faixa (2,264–0,396) ³⁰ \$.L ⁻¹	p/ 50000 L custo=2,015 \$.L ⁻¹ 100750 \$	(PROTANK, 2020)
Bomba dosadora /15 m	1,609 m ³	290 \$.m ⁻³	$1,609 \times 290 \frac{\$}{m^3} = 466,6 \$$	(SEINETECH, 2010)
Chiller	7,5 kW	2771 \$.kW ⁻¹	$7,5 \text{ kW} \times 2771 \frac{\$}{\text{kW}} = 20782 \$$	(VARKARAKI, 2009)
Eletrolisador, planta eletrólise	382,25 kW*CP=23,19m ³ h ⁻¹	C _u =2350,9.CP ^{-0,1038} C _u = 1696 \$.kW ⁻¹	$382,3 \text{ kW} \times 1696 \frac{\$}{\text{kW}} = 648423 \$$	(CAMPANHOLO, 2016) * Ver Tabela 4.7 o consumo eletrolizador; tempo 2,93h.
Tanque de NaClO (FRP)	4076 L	Faixa (2,264–0,396) \$.L ⁻¹	p/ 4500 L custo=2,245 \$.L ⁻¹ 10103 \$	(PROTANK, 2020)
Bomba alimentação/15m	4,076 m ³	290 \$.m ⁻³	$4,076 \times 290 \frac{\$}{m^3} = 1182 \$$	(SEINETECH, 2010)
Soprador	2,9 kW; 2,87 ft ² ; $10473 \frac{ft^3}{min}$ (17793 m ³ h ⁻¹)	Modelo HTMF-63-4T-3; 3 HP; Diâmetro= 63 cm; (17995 m ³ h ⁻¹)	2450 \$ (2141,6 €)	(SODECA, 2018)
Compressor (x3)	6,11 kg H ₂	3 x 40000 £ para 30 bar	150000 \$	(PURE ENERGY CENTRE, 2020);
Armazenamento H ₂	294 kg H ₂ max	257,35 \$.kg ⁻¹ H ₂	75661 \$	(ESPINOLA, 2013)
Célula a Combustível	428,3 kW (estimado)	Eficiência =52% 1800 \$.kW ⁻¹ 33,3 kWh.kg ⁻¹	$428,3 \text{ kW} \times 1800 \frac{\$}{\text{kW}} = 770940 \$$	(SAITO, 2018) Tabela 4.7 para calcular
Sistema Solar Fotovoltaico	382,25 + 46,01 = 428,3 kW (demandado) 509 kW_p (total)	1850 \$.kW ⁻¹ 2400 \$.kW ⁻¹	$\frac{1120 \frac{kWh}{dia}}{2,93 \frac{h}{dia}} = 382,3 \text{ kW}$ (só eletrolizador) $509 \text{ kW} \times 2400 \frac{\$}{\text{kW}} = 1221600 \$$	(NREL, 2017) (BERKELEY LAB., 2019) (FRANCO LEON et al., 2020) Ver Tabela 4.7
Insumos	Quantidade	Custo	Cálculo	Fonte
Sal NaCl	12746,93 $\frac{kg}{mês}$	0,72 (\$/kg)	$12746,93 \times 0,72 = 9178 \.mês^{-1}	Ver Tabela 3.1
NaOH	42,3 $\frac{L}{mês}$	0,61 (\$/kg)	$42,3 \times 0,61 = 25,8 \.mês^{-1}	QUIMINET, 2017.

³⁰Neste caso a equação de correlação entre custo \$.L⁻¹ (y) e Litros (x); y = -5E-06x + 2,265; R² = 1

Tabela 4. 10. Cenário 2- equipamentos & insumos da planta

Equipamento	Quantidade	Custo	Cálculo	Fonte
Bomba reservatório/50m	13,57 m ³	290 \$.m ⁻³	$13,57 \times 290 \frac{\$}{m^3} =$ 3935 (\$)	(SEINETECH, 2010)
Bomba tanque saturador /50m	2,034 m ³	290 \$.m ⁻³	$2,034 m^3 \times 290 \frac{\$}{m^3} =$ 590 \$	(SEINETECH, 2010)
Abrandador água	(15 +10)ft ³	463,4–660 \$.ft ⁻³ resina	660 S.ft⁻³ (máximo custo)	(AMAZON, 2020); (INGENIERIAQUIMICA.COM, 2011)
Tanque salmoura (FRP)	48270 Litros	Faixa (2,264–0,396) ³¹ \$.L ⁻¹	p/ 50000 L custo=2,015 \$.L ⁻¹ 100750 \$	(PROTANK, 2020)
Bomba dosadora/15m	1,609 m ³	190 \$.m ⁻³	$1,609 m^3 \times 190 \frac{\$}{m^3} =$ 305,7 \$	(SEINETECH, 2010)
Chiller	7,5 kW	2771 \$.kW ⁻¹	$7,5 \text{ kW} \times 2771 \frac{\$}{\text{kW}} =$ 20782 \$	(VARKARAKI, 2009)
Eletrolisador, planta eletrólise	130 kW * CP= 7,856 m ³ h ⁻¹	C _u =2350,9.CP ^{-0,1038} C _u = 1898 \$.kW ⁻¹	$130 \text{ kW} \times 1898 \frac{\$}{\text{kW}} =$ 246749 \$	(CAMPANHOLO, 2016) *Ver Tabela 4.3 consumo eletrolizador; tempo= 8,65h
Tanque NaClO (FRP)	4076 L	Faixa (2,264–0,396)\$.L ⁻¹	p/ 4500 L custo=2,245 \$.L ⁻¹ 10103 \$	(PROTANK, 2020)
Bomba alimentação/15m	4,076 m ³	190 \$.m ⁻³	$4,076 m^3 \times 190 \frac{\$}{m^3} =$ 774,4 \$	(SEINETECH, 2010)
Soprador	2,9 kW; 2,87 ft ² ; $10473 \frac{ft^3}{min}$ (17793 m ³ h ⁻¹)	Modelo HTMF-63-4T-3; 3 HP; Diâmetro= 63 cm; (17995 m ³ h ⁻¹)	2450 \$ (2141,6 €)	(SODECA, 2018)
Compressor	6,11 kg H ₂	40000 £ para 30 bar	50000 \$	(PURE ENERGY CENTRE, 2020);
Armazenamento H ₂	294 kg H _{2 max}	257,35 \$.kg ⁻¹ H ₂	75661 \$	(ESPINOLA, 2013)
Instalação MT Elétrica	14000 m da subestação; Transformador 3F /163 kW; Retificador p/ 132 kW	27,39 \$.m ⁻¹ (condutor protegido 95 mm ²)	Transformador 3F (200 kVA) 5350 \$; Retificador Magna-Power: 150kW; Eficiência: 92%. 12500 \$	(ANDE, 2008) (FRANCO LEON, 2008) (GOTZE, 2020) (MAGNA-POWER, 2020) (ALIBABA.COM, 2020)
Insumos	Quantidade	Custo	Cálculo	Fonte
Energia elétrica	163 kW_{inst} $1199,6 \frac{kWh}{dia}$; $35989 \frac{kWh}{mes}$	(6,05) \$.kW ⁻¹ .mês ⁻¹ (0,0266) \$.kWh ⁻¹ .mês ⁻¹	Categoria 372 Tensão (23 kV). Pot. reservada Energia fora de ponta	Pliego Tarifa N°21(ANDE, 2019) O consumo na Tabela 4.7
Sal NaCl	$12746,93 \frac{kg}{mes}$	0,72 (\$/kg)	$12746,93 \times 0,72 =$ 9178 \$.mês⁻¹	Ver Tabela 3.1
Soda Cáustica	$42,3 \frac{L}{mes}$	0,61 (\$/kg)	$42,3 \times 0,61 =$ 25,8 \$.mês⁻¹	QUIMINET, 2017.

1US\$=6300 Gs. (BCP, 2020)

³¹Neste caso a equação de correlação entre custo \$.L⁻¹ (y) e Litros (x); y = -5E-06x + 2,265; R² = 1

A Tabela 4.11, mostra os parâmetros do custo de investimento da planta local, segundo Campanholo (2016), como indicado na metodologia proposta. Para ambos cenários se considerou o mesmo consumo específico de energia do eletrolisador e produção diária de NaClO e H₂, embora a potência de cada eletrolisador, o tempo de produção e o custo da planta em função da produção de H₂ por hora sejam diferentes.

Tabela 4. 11. Parâmetros de investimento de capital na planta local - Cenário 1 & Cenário 2

Parâmetro	Valor	Unidade	Cenário
Potência do eletrolisador	382,25	kW	1
	129,5	kW	2
Tempo diário fonte de energia	2,93	h.dia ⁻¹	1
	8,65	h.dia ⁻¹	2
Custo unitário da planta de eletrólise	1.696	\$.kW ⁻¹	1
	1.898	\$.kW ⁻¹	2
Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Consumo específico de energia do eletrolisador	1.120	kWh.dia ⁻¹	Klorigen (2020)
Taxa anual de desconto	10	%	Furlan (2012)
Vida útil da planta	20	anos	Furlan (2012)
Fator recuperação de capital	11,75	%	Godoy (2008)
Taxa do custo de infraestrutura civil	18	%	Perters et al (2003)
Taxa Custo Logístico	11,4	%	Lindstrom et al. (2019)
Taxa de engenharia e supervisão	20	%	Perters et al (2003)
Taxa de despesas de construção	17	%	Perters et al (2003)
Taxa de contingências	15	%	Perters et al (2003)
Taxa anual do custo com O&M	6	%	Godoy (2008)

A Taxa do Custo Logístico, em (%) do total do Investimento inicial, considerou o custo da logística até uma localidade afastada no Chaco.

A limpeza e manutenção dos painéis fotovoltaicos (especialmente decorrentes do pó depositado), que pode causar perda de eficiência devido à camada formada na superfície, foram incluídas no investimento inicial.

Por outro lado, para o Cenário 1, os custos adicionais de reposição de peças do SFV danificadas ao longo do tempo, de preços locais em comparação ao preço FOB, foram considerados nas taxas de contingências, em (%) do valor investido.

O estudo de Lindstrom et al. (2019), uma planta SFV isolada de 40 kWp, localizada em Lagerenza no Chaco, permitiu estimar alguns custos, mas sem considerar ainda o fator de escala, o que, portanto, deveriam ser ainda menores aos considerados nesta tese. Mesmo que os valores dos preços do SFV, incluindo os inversores, possam ser de referência FOB, considera-se que os preços devem cair para o ano 2020 (em comparação ao ano base 2016 do investimento), assumindo-se a tendência mundial e considerando o fator de escala da planta.

Para o Cenário 1, a Tabela 4.12 mostra que o SFV aumenta o custo total inicial, porém não há o custo de aquisição da energia elétrica da rede. Além disso, o custo de compressão aumenta ao triplo quando comparado ao Cenário 2, devido ao menor tempo de trabalho, 2,93 HSP, utilizado no dimensionamento dos equipamentos com energia solar.

Tabela 4. 12. Investimento & custos do Cenário 1

Investimento Cenário1	Custos	
Eletrolisador-planta eletrólise	648.423	\$
Sistema Fotovoltaico	1.221.600	\$
Equipamento total da planta		
Célula a Combustível	770.940	\$
Bombas de água	9.919	\$
Tanquessalmoura+ abrandador	117.250	\$
Sistema de armazenamento+ 3x compressor H ₂	225.661	\$
Tanque de NaClO +soprador	12.553	\$
Reservatórioevaporaçãoexterno	40.710	\$
Custo Total Equipamentos	1.177.032	\$
Custo infraestrutura civil	211.866	\$
Custo Logístico	134.182	\$
Custo engenharia & supervisão	235.406	\$
Custo despesas de construção	200.095	\$
Custo contingência	176.555	\$
Custo total inicial da planta H₂+ NaClO	4.005.160	\$
Custo anual de Capital	470.606	\$.ano ⁻¹
Custo anual de O&M	240.310	\$.ano ⁻¹
Custo anual de energia elétrica	n.a.	\$.ano ⁻¹
Custo anual de insumos para produção	310	\$.ano ⁻¹

Para o Cenário 2, baseado nos custos dos equipamentos e insumos anteriormente calculados, a Tabela 4.13 apresenta os investimentos e demais custos da planta. Dado que o

H₂ produzido e o NaClO seriam comercializados, não se incluiu a CaC no custo de investimento inicial.

Tabela 4. 13. Investimento & custos do Cenário 2

Investimento Cenário2	Custos	
Eletrolisador-planta eletrólise	246.749	\$
Equipamento total da planta		
Linha de distribuição MT 23kV	383.460	\$
Transformador +Retificador	17.850	\$
Bombas de água	5.605	\$
Tanquesalmoura+ amaciador	117.250	\$
Sistema de armazenamento+compressor H ₂	125.661	\$
Tanque de NaClO + soprador	12.553	\$
Reservatórioevaporaçãoexterno	40.710	\$
Custo Total Equipamentos	703.089	\$
Custoinfraestrutura civil	126.556	\$
Custo Logístico	80.152	\$
Custoengenharia&supervisão	140.618	\$
Custodespesas de construção	119.525	\$
Custocontingência	105.463	\$
Custo total inicial da planta H₂+ NaClO	1.522.152	\$
Custo anual de Capital	178.853	\$.ano ⁻¹
Custo anual de O&M	91.329	\$.ano ⁻¹
Custo anual de energia elétrica	23.321	\$.ano ⁻¹
Custo anual de insumos para produção	310	\$.ano ⁻¹

Por outro lado, dado que o custo anual do insumo NaCl da planta (110.136 \$) é superior ao investimento inicial de um reservatório de evaporação de sal solar (40.710 \$), optou-se pelo último método para obter o NaCl. Neste caso, anualmente a planta estaria poupando 110.133 \$.ano⁻¹ pela compra evitada de sal.

A Tabela 4.14 mostra a venda do NaClO e H₂ ao preço de referência 13,99 US\$.kg⁻¹ (CAFCP, 2015; ARB, 2015), caso seja totalmente comercializado, utilizado no fluxo de caixa. A venda de H₂ inicial mostrada não considera ainda a diminuição da produção pela perda de eficiência do sistema SFV ao longo dos anos. Isto foi analisado na seção seguinte.

Tabela 4. 14. Venda anual de NaClO e H₂ da planta

Venda de NaClO (15%) Mercado Nacional	894.000	\$.ano ⁻¹
Venda de H ₂ Mercado Nacional	29.918	\$.ano ⁻¹

4.5. Análise de Viabilidade Econômica dos Cenários

Fazendo o fluxo de caixa do Cenário 1 (na mesma produção diária de NaClO e H₂ que o Cenário 2), considerou-se um período de 20 anos e a taxa anual de desconto de 10%, típico para empreendimentos desta natureza no Paraguai. Como resultado, o VPL se mostrou negativo (-2.863.651US\$) e com TIR < 0. Isto mostra a negativa atratividade econômica da implantação de uma planta híbrida com energia solar fotovoltaica e aproveitamento do H₂ em CaC, caso seja de funcionamento autônoma. A CaC aumenta o custo total, sendo que o menor tempo de funcionamento da planta aumenta o tamanho do equipamento.

Porém, neste caso ainda não se considerou o potencial do excedente de energia. O excedente de produção de energia fotovoltaica, quando superior ao tempo de 2,93 HSP, pode inclusive ser exportado à comunidade próxima da planta local na forma de energia elétrica, ou utilizado para produzir mais NaClO durante o dia e, portanto, mais H₂. Isto dependerá das condições de inserção na rede elétrica de distribuição local, que até o momento de elaboração desta tese ainda não está regulamentada em nível nacional, e pode significar um aumento da receita da planta local, pela venda desta energia excedente à concessionária no futuro. Considerando esse excedente de geração do SFV, uma análise de sensibilidade foi desenvolvida também para determinar qual rota seria a mais adequada para otimizar o seu uso.

A produção estimada da planta SFV foi de 801,83 MWh.ano⁻¹, sendo o consumo da planta de NaClO de 477,71 MWh.ano⁻¹. Portanto, os 324,12 MWh.ano⁻¹ exportável à rede representa um excedente significativo para a planta (67,8% do consumo da planta). Considerando a tarifa residencial média em baixa tensão de 0,066 US\$.kWh⁻¹.mês⁻¹ (ANDE, 2019), sem considerar juros e taxas de uso da rede, a renda pela venda de energia elétrica seria 1.777,3 US\$.mês⁻¹ (21.327 US\$.ano⁻¹).

Para determinar a viabilidade econômica do excedente SFV, foi feito uma curva de sensibilidade do VPL em função da Venda do Excedente de Energia Elétrica, apresentada na Figura 4.4. A curva mostra como o VPL do projeto aumenta à medida que se opta pela maior produção de NaClO em detrimento da venda de eletricidade excedente, considerando a tarifa

média em baixa tensão da ANDE. A estimativa apresentada também leva em conta a diminuição de geração SFV ao longo dos anos (-0,6% ao ano), o aumento dos custos de O&M e insumos necessários.

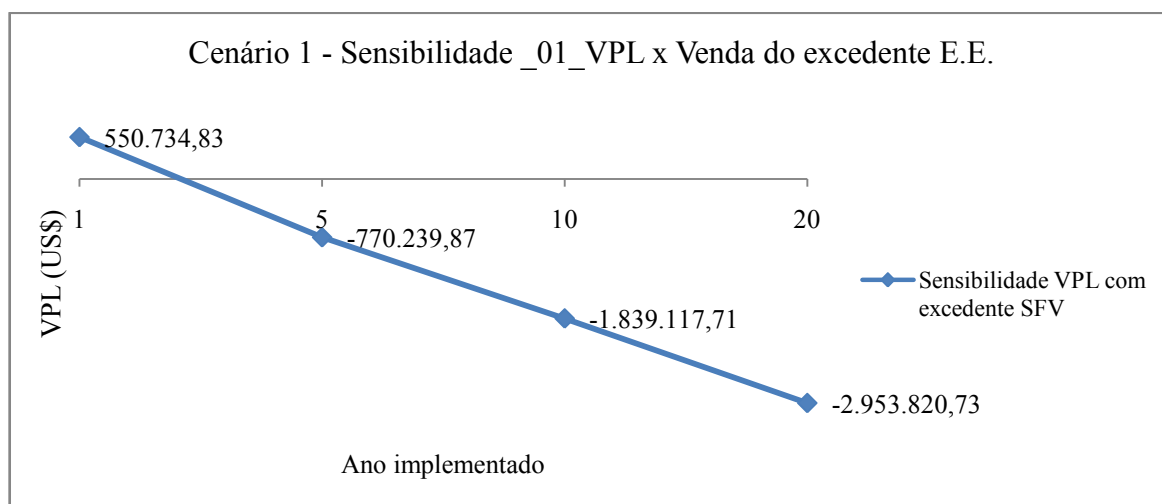


Figura 4. 4. Análise de sensibilidade da venda excedente energia elétrica SFV no Cenário 1

Portanto, é mais vantajoso utilizar o excedente do SFV para produzir mais NaClO do que vender o excedente em forma de energia elétrica, dado o baixo preço local da eletricidade. Nesta curva de sensibilidade do Cenário 1 não se considera a venda do H₂ produzido, sendo armazenado para uso com a CaC dentro da planta. O resultado mostra a conveniência de produzir mais NaClO e H₂ associado, desde o início do projeto, no ano 1 sendo o VPL de 550.735 US\$.

Dada a vantagem de produzir NaClO e H₂, foi desenvolvida outra curva de sensibilidade. Neste caso, considerou-se que o H₂ seria tanto armazenado como comercializado. Assim, a Figura 4.5, mostra a sensibilidade da venda ou não do H₂ armazenado no tanque.

Caso o SFV não possa abastecer a planta de NaClO com energia elétrica durante o dia, parte do H₂ deve ser armazenado e o restante pode ser comercializado. A curva mostra que o menor valor do VPL (550.735 US\$) coincide com o valor maior da Figura 4.4, caso não seja vendido H₂, o que é condizente com as hipóteses assumidas em ambos os casos (opção pela produção de NaClO ou pela venda de H₂, ambos com o excedente elétrico do SFV).

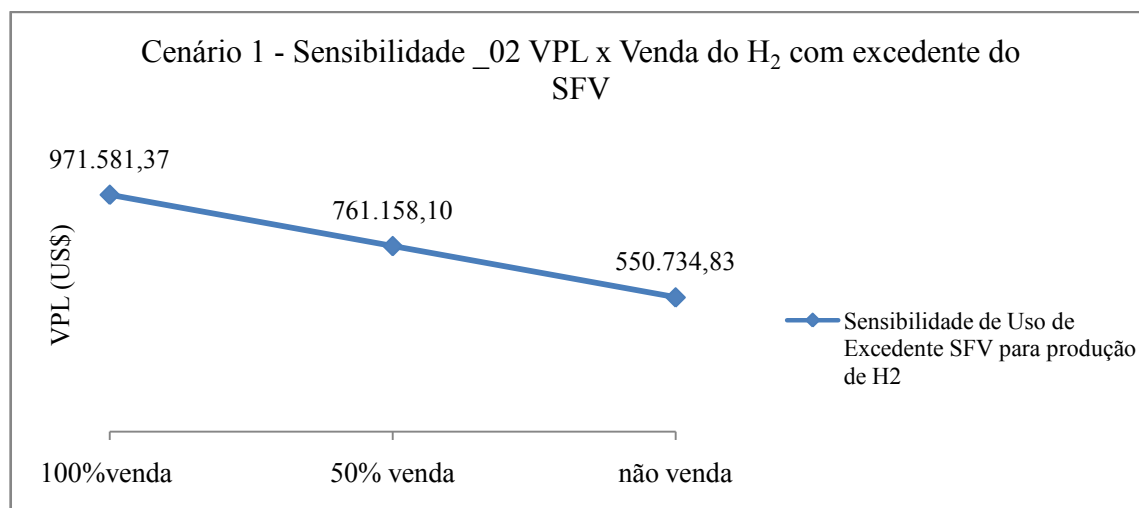


Figura 4. 5. Análise de sensibilidade da venda de H₂ com a energia excedente do SFV no Cenário 1

No caso de não ser comercializado, o tanque pode armazenar H₂ por menos tempo do que 44 dias previstos, dado que a produção excedente de H₂ adicionada à diária normal preencheriam o tanque em 26 dias. O tanque de 2.993 m³ de H₂ cheio pode abastecer o consumo de toda a planta sem energia SFV por até 3,5 dias até o esgotamento. Portanto, caso 50% do H₂ seja vendido, existe armazenamento suficiente para cobrir as necessidades energéticas da planta, além de aumentar o VPL (761.158 US\$).

O resultado do Cenário 2, para um período de 20 anos e taxa de desconto de 10%, indicou um VPL positivo (3.579.962 U\$). A TIR encontrada de 41% confirma a viabilidade de uma planta local atendida com energia elétrica da rede de distribuição a partir da subestação próxima.

Em ambos cenários não se considerou a aquisição de sal, dado que o reservatório pode suprir à planta durante o ano. Este resultado permite economizar 110.133 \$ por ano em insumos de NaCl, como já mencionado. Somente o NaOH é o insumo demandado no regenerador da resina de sulfato. No caso de utilizar o excedente para maior produção de NaClO e H₂, seria necessário ampliar o tamanho do reservatório para obter maior quantidade de sal, o qual foi considerado nos fluxos de caixa dos casos de sensibilidade apresentados anteriormente.

Neste caso, dada a proximidade do poço da Lagoa de 14 km até a subestação de Loma Plata, o Cenário 2 apresentou resultado mais atrativo.

Por outro lado, caso o poço estivesse mais longe o resultado seria diferente. A viabilidade do Cenário 2 em relação ao Cenário 1 depende da distância da fonte de eletricidade, sendo que para uma planta a 64 km de distância da subestação, o custo inicial da linha aumentaria até 4.006.425 US\$ e VPL seria igual ao do Cenário 1, tornando-o menos atrativo para distâncias superiores comparado ao caso isolado da rede.

A Figura 4.6 mostra a relação de dependência do custo de investimento em relação à distância da rede, onde pode ser determinada a atratividade do Cenário 1 para distâncias superiores a cerca de 65 quilômetros da subestação.

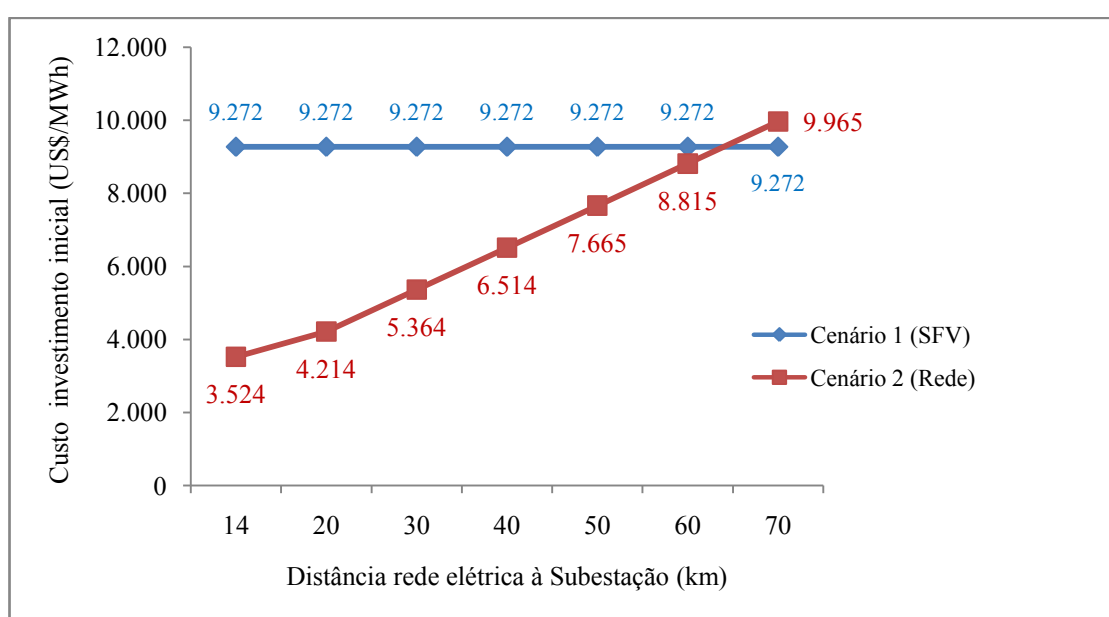


Figura 4. 6. Curva de custo x distância da rede elétrica

5. CONCLUSÕES

O recurso hídrico é um dos principais problemas que existe na região do Chaco, caracterizado pela escassez de fontes de água potável suficientes para o consumo humano em algumas localidades - sendo as cisternas de água de chuvas a principal forma de armazenamento residencial. Durante a estação de estiagem até as fontes superficiais, rios e lagoas ficam secas, afetando a fauna silvestre e degradando a superfície do solo. Mesmo assim, as águas subterrâneas mantêm uma alta salinidade confinadas em poços, podendo ser aproveitadas de maneira distinta, não somente como uma fonte de água potável, mas procurando uma melhor alternativa sustentável.

Nesta tese se propôs o uso da água subterrânea da região do Chaco em uma planta local de NaClO que pudesse substituir a importação paraguaia, considerando o ano base 2017. Nesse sentido, identificou-se as características adequadas para que possam ser utilizadas como fonte natural no eletrolisador. Identificou-se o Poço 1 Lagoa Curacao- Noreste Loma Plata - com características adequadas para a geração local, considerando que o H_2 obtido no processo de eletrólise possa ser reaproveitado por meio de CaC, ou disposto em tanques para sua comercialização.

O H_2 tem importância notável na transição energética, como vetor energético, inclusive no setor de transportes, dada as vantagens de ser utilizado como combustível em veículos a CaC. Isto permitiria a diminuição do uso de combustíveis fósseis, menores emissões de CO_2 e ajudaria a cumprir as metas propostas de redução de emissões no Acordo de Paris pelo Paraguai, que se encontram nas Contribuições Nacionais Determinadas (NDC),

Dadas as novas incertezas que acontecem recentemente no mundo devido à pandemia da COVID-19, onde a provisão de matéria prima para a produção das indústrias pode ser afetada e no qual a demanda de NaClO, empregado na desinfecção e limpeza de superfícies, pode aumentar, a planta proposta que utilizaria os recursos existentes no país mostra-se uma alternativa estratégica.

Assim, considerando a importância de contar com uma planta com essas características, dimensionou-se os equipamentos necessários para a produção local de $1.358,67 \text{ L.dia}^{-1}$ ($40.760 \text{ L.mês}^{-1}$), levando em conta os preços do NaClO e concentrações do mercado nacional. Tendo em conta que o eletrolisador tem uma concentração de produção determinada

pelo fabricante, optou-se pela produção à 15% de concentração, considerando o maior valor de mercado e podendo ser diluído para sua comercialização.

Foram considerados dois cenários em que se pode atender a demanda elétrica da planta de NaClO: uma isolada da rede elétrica (Cenário 1), dado que a localização da fonte de água pode estar afastada das cidades; e outra com extensão e conexão à rede elétrica local (Cenário 2). Como a produção isolada considerou o uso de SFVs, com dependência da energia solar, foi dimensionado um eletrolisador que garanta o cumprimento dos requisitos de produção diária de NaClO da planta em menor tempo do que um eletrolisador conectado à rede elétrica, mantendo-se a mesma produção nos cenários.

A irradiação solar média na área de estudo foi 4,9 HSP, sendo que para o dimensionamento foi considerado o menor valor médio de 2,93 HSP para atender as cargas elétricas todo o ano. O H₂ produzido e armazenado em tanque pode ser reaproveitado para aumentar a produção, segundo necessidades da planta. Além disso, existe um excedente de energia SFV de 324,12 MWh.ano⁻¹. Já no Cenário 2, caso a planta funcione com energia da rede elétrica, o H₂ obtido como subproduto pode ser comercializado.

O estudo de viabilidade econômica realizado mostrou a negativa atratividade do Cenário 1. Este resultado foi alterado ao considerar que o sistema híbrido SFV/H₂/CaC isolado da rede atenderia a produção de NaClO e, com o aproveitamento do 50% do H₂ armazenado poderia ainda comercializá-lo (VPL positivo de 761.158 US\$ e TIR de 13%).

Mesmo nessa condição, a atratividade é bem menor quando comparado ao Cenário 2, cujo VPL encontrado foi de 3.579.962 US\$, com TIR de 41%. Essa atratividade muda quando aumenta a distância da subestação até o local escolhido para inserção da planta de NaClO, confirmando uma dependência inexistente no Cenário 1. As estimativas mostram que a partir de 64 km de distância, é mais conveniente adotar a planta isolada da rede, dado os custos associados. Isto torna o SFV híbrido uma opção importante para esse tipo de empreendimento.

Caso existam estudos posteriores que considerem localidades afastadas das cidades, ou modos de operação diferentes aos considerados neste trabalho, espera-se que esta tese venha a auxiliar nos estudos e na busca por novas alternativas a métodos tradicionais de produção industrial de NaClO, aproveitando os recursos naturais que existem e reaproveitando eficientemente o subproduto H₂ como vetor energético.

5.1. Propostas de Estudos Futuros

A fim de aprofundar os estudos sobre a produção de NaClO a partir de um sistema híbrido de geração distribuída de energia elétrica, trabalhos futuros podem ser realizados para otimizar a produção da planta de forma a ajustar os parâmetros ao consumo de NaClO ao longo do ano.

Além disso, sugere-se avaliar o desempenho ambiental da planta proposta através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, considerando os impactos ao meio ambiente e comparando aos métodos tradicionais de produção deste produto químico.

Outra sugestão é a análise de modelos de comercialização e mercado, incluindo o dimensionamento adequado das estações de distribuição de H₂ combustível.

Referências Bibliográficas

ACQUAMÁXIMA (2020). **Abrandadores de água**. Disponível em: <https://acquamaxima.com.br/produtos/abrandadores/>. Acesso em: 13 abril 2020.

ACS, ACS Medio Ambiente. **Sistemas para tratamiento de agua**. Equipos y Sistemas Para el Tratamiento de Agua. Disponível em: <http://www.acsmedioambiente.com/suavizadores.html>. Acesso em 01 junho 2020.

ADHIKARI, S.; FERNANDO, S. D.; HARYANTO, A. Hydrogen production from glycerol: An update. **Energy Conversion and Management**, vol. 50, n.10, p. 2600 - 2604, October 2009. ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.06.011>.

AEH2, **Asociación Española del Hidrógeno**. El Hidrógeno. Factor de compresibilidad. Disponível em: <http://www.aeh2.org/>. Acesso em: 16 abril 2020.

ALIBABA.COM.Alibaba Group. **Products. Rectifier**. Disponível em: www.alibaba.com. Acesso em: 26 abril 2020.

AMAZON, Amazon.com. **Ablandador de agua 1ft3**. Disponível em: <https://www.amazon.com/>. Acesso em: 29 março 2020.

AMIN, A. M.; CROISSET, E.; EPLING, W. Review of methane catalytic cracking for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 36, n.4, p. 2904-2935, 2011. ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.035>.

ANDE, Administração Nacional de Eletricidade. **Plan Maestro de Generación y Transmisión 2016-2025**, 2016. Disponível em: https://www.ande.gov.py/plan_maestro.php. Acesso em: 22 de junho 2020.

ANDE, Administración Nacional de Electricidad. Departamento de Proyectos de Distribución. **Costos Modulares en Media Tensión**, nov. 2008.

ANDE. Administración Nacional de Electricidad (ANDE). **Pliego de Tarifa N°21**. (versão atualizada), pela Resolución P/N° 42847 da Administración Nacional de Electricidad, 28 de outubro de 2019. Disponível em: <https://www.ande.gov.py/docs/tarifas/PLIEGO21.pdf>. Acesso em 30 junho 2020.

ARB, Air Resource Board. **2015 Annual Hydrogen Evaluation**, 53p. Disponível em: https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2018-12/ab8_report_2015.pdf. Acesso em: 20 abril 2020.

ARKEMA, GPS Safety Summary **SODIUM HYPOCHLORITE**. Disponível em: <https://www.arkema.com/export/shared/.content/media/downloads/socialresponsability/safety-summuries/Hydrogen-Peroxide-Sodium-Hypochlorite-GPS-2013-02-10-V0.pdf&usg=AOvVaw1o5mnKrnoEbqsia9lnESEL>. Acesso em: 22 junho 2020.

ATERSA, Atersa Electricidad Solar - Grupo Elecnor. **Bombeo directo mediante energía solar**. Catálogo, SMP Instrucciones de Funcionamento, p.22, 2011.

AVASTHI, K. S.; REDDY, R.N.; PATEL, S. Challenges in the Production of Hydrogen from Glycerol – A Biodiesel Byproduct Via Steam Reforming Process. **Procedia Engineering**, Vol. 51, 2013, p. 423-429, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.059>.

AYALA, U. D.; CARRILLO-BAEZA, J. G. Estudio del comportamiento térmico de agua para uso residencial en tinacos de concreto y polietileno en un clima cálido-subhúmedo. **Ingeniería Investigación y Tecnología**, volumen XVI, n.4, 2015: 573-583. ISSN 1405-7743 FI-UNAM. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.009>.

BABIR, F. **PEM fuel cells – theory and practice**. Elsevier, Amsterdã, Holanda, 2005.

BANKS, L.M.; DIAZ DE VIVAR, V. Exploration in Paraguay Reactivated. **Oil and Gas Journal**, vol. 73, n.40, p. 164-168, 1975.

BARUTH, E. **Water treatment plant desing**. USA. McGraw-Hill, 1990.

BCP. Banco Central do Paraguai. **Cotação minorista do tipo de câmbio nominal**. Disponível em: <https://bcp.gov.py/cotizacion-minorista-del-tipo-de-cambio-nominal-i368>. Acesso em 27 agosto 2020.

BENDER, H.; REPSOL, H. Hydrogeologische und geophysikalische untersuchungen zur grund wasserschließung für das schachthot projekt in den mennoniten kolonien im zentralen Chaco-Paraguay. **Hannover RFA Bundensanstalt für Bodenforschung**, p.47, 1970.

BERKELEY LAB. Electricity Markets & Policy. **Tracking the sun**. Files. Report. Disponível em: <https://emp.lbl.gov/tracking-the-sun>. Acesso em: 13 julho 2020.

BLACK & VEATCH CORPORATION. **White's Handbook of chlorination and alternative disinfectants**. 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2010.

CAFCP. California Fuel Cell Partnership. **Cost to refill**. Disponível em: <https://cafc.org/content/cost-refill>. Acesso em 20 abril 2020.

CAMPANHOLO, T. R. **Metodologia para Estimativa das Emissões Evitadas de Gases de Efeito Estufa na Geração de Energia Elétrica a partir do Hidrogênio Eletrolítico obtido através da Energia Vertida Turbinável**. Tese (Doutorado):Faculdade de Engenharia Mecânica–FEM, Programa de Planejamento de Sistemas Energéticos,Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2016, p.148, 2016.

CARBOTECNIA. **Intercambio Iónico**. Disponível em: <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/intercambio-ionico/>. Acesso em 22 de junho 2020.

CERVANTES ANANGONÓ, L. A. **Diseño y construcción de un ablandador de agua mediante el empleo de resinas de intercambio iónico para abastecer los equipos térmicos del laboratorio de termodinámica**. Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Mecânica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, p.125, 2015.

CHEN, H.; DING, Y.; CONG, N. T.; DOU, B.; DUPONT, V.; GHADIRI, M.; WILLIAMS, P. T. (2011). A comparative study on hydrogen production from steam-glycerol reforming: thermodynamics and experimental. **Renewable Energy**, Vol. 36, n.2, 2011, pp. 779-788, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.026>.

CHINELLO, E. *et al.* A comparative performance analysis of stand-alone, off-grid solar-powered sodium hypochlorite generators. In: **RSC Advances**, 9, n.25, p. 14432-14442, 2019. DOI: 10.1039/C9RA02221J.

CLIMATE-DATA. Tabla climática. **Datos históricos del tiempo Loma Plata**, 2020. Disponível em: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/paraguay/boqueron/loma-plata-56216/>. Acesso em: 12 abril 2020.

CNDC. Comisión Nacional de Desarrollo del Chaco; OEA. **Diagnóstico y estrategias para el desarrollo del Chaco**. Asunción, CNDRCh, p.182, 1983a.

CNDC. Comisión Nacional de Desarrollo del Chaco; OEA. **Suelos y aptitud de uso de la tierra del Chaco Paraguayo**. Asunción, CNDRCh, p.105, 1983b.

COMIP, Comisión Mixta argentino – paraguaya del Río Paraná (2018). **Proyecto Corpus**. Outubro 2018. Disponível em: <https://www.comip.org.ar/corpus/>. Acesso em: 05 de fevereiro 2020.

COMIP, Comisión Mixta argentino – paraguaya del Río Paraná. **Proyecto Itati-Itacorá**. Maio 2017. Disponível em: <https://www.comip.org.ar/itati-itacora/>. Acesso em: 05 de fevereiro 2020.

CORREIA-SOUSA J., *et al.* The effect of water and sodium hypochlorite disinfection on alginate impressions. **Revista Portuguesa Estomatologia, Medicina Dentária e Cirurgia Maxilofacial**. vol. 54, n.1, p. 8-12, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rpemd.2012.12.003>.

CRISTALDO, F. A. L. **Exploração e Aproveitamento dos Recursos Hídricos do Chaco Central paraguaio**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências - USP, São Paulo, 2002.

CRISTALDO, F. A. L.; FARÍÑA, S.; ORUÉ, D. (2002). **Estudio Preliminar de Áreas de Descarga del Acuífero Salado del Chaco Central (Bacía Riacho Yakaré)**. Loma Plata. Hidrogeologia e Hidrología del Paraguay. Disponível em: <http://www.geologiadelparaguay.com.py/Hidro.htm>. Acesso em 17 junho 2020.

CRISTALDO, F.A. L.; GARCIA, D. **Consideraciones sobre la salinidad de lagunas y tajamares del chaco central**. Revista Geológica, Asociación de Geólogos del Paraguay, n.1, p. 29 – 41, 1991.

DA SILVA, E. P. **Fontes Renováveis de Energia: produção de energia para um desenvolvimento sustentável** - 1ra Edição. Editorial Livraria da Física. Campinas, SP, 2014. ISBN: 978-85-7861-256-6.

DA SILVA, E. P. Industrial prototype of a hydrogen compressor based on metallic hydride technology. **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 18, n.4, 1993, pp. 307-311, ISSN 0360-3199. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(93\)90044-B](https://doi.org/10.1016/0360-3199(93)90044-B).

DAVIS & DE WIEST. **Hydrogeology**. John Wiley & Sons, Inc. New York, p. 463, 1967.

DGEEC. Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos, 2012. **Censo de Comunidades de los Pueblos Indígenas Resultados Finales 2012**. Disponible em: <https://www.dgeec.gov.py/Publicaciones/Biblioteca/comunidad%20indigena/Censo%20de%20Comunidades%20de%20los%20Pueblos%20Indigenas%20Resultados%20Finales%202012.pdf>. Acesso em 15 junho 2020.

DGEEC. Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos. **Estadísticas por Tema – Población Proyección de la población por sexo y edad, según distrito, 2000-2025**. Disponible em: <https://www.dgeec.gov.py/>. Acesso em 11 junho 2020.

DMH, Dirección de Meteorología e Hidrología. **Boletín Agrometeorológico**. Temperatura máxima média mensual. Disponible em: <https://www.meteorologia.gov.py/publicaciones/>. Acesso em: 12 abril 2020.

DNCP, Dirección Nacional de Contrataciones Públicas (DNCP). **Sistema de Información de las Contrataciones Públicas**. Adjudicación. Hipoclorito de Sodio - concentrado con hipoclorito de sodio de 2,5% de concentración como mínimo. Cotización por litro en bidones de 5 litros, 2016. Disponible em: [https://www.contrataciones.gov.py/sicp/adjudicacion/detallesProveedorPublico.seam?proveedorAdjudicadoId=KE%2FuVeVc9s4%3D&actionMethod=adjudicacion%2FadjudicacionPublica.xhtml%3AproveedoresAdjudicacionAction.initFromDetalleProveedorPublico\(\)&cid=36610](https://www.contrataciones.gov.py/sicp/adjudicacion/detallesProveedorPublico.seam?proveedorAdjudicadoId=KE%2FuVeVc9s4%3D&actionMethod=adjudicacion%2FadjudicacionPublica.xhtml%3AproveedoresAdjudicacionAction.initFromDetalleProveedorPublico()&cid=36610). Acesso em: 30 junho 2020.

EBY, Entidad Binacional Yacyretã. **Datos sobre el proceso licitatorio de Aña Cuá**. Maquinación Brazo Aña Cuá, 2018. Disponible em: <https://www.eby.gov.py/index.php/8766-maquinizacion-del-brazo-ana-cua>. Acesso em: 22 junho 2020.

EL PAIS. Rurales. Campos. **Nuevos negocios, ¿cuánto vale comprar un campo en Paraguay?**. Periodico de circulação digital, 12 julho 2018. Disponible em: <https://rurales.elpais.com.uy/campos/nuevos-negocios-cuanto-vale-comprar-un-campo-en-paraguay>. Acesso em 05 agosto 2020.

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1998. Publicaciones. **Bibliografía de Proyectos GCP/RLA/084/JPN**. Disponible em: http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/pubs/biblio/proyecto/gcp/rla/084-jpn.htm. Acesso em 16 junho 2020.

FARIÑA DOLSA, S.; CRISTALDO, F.A.L. **Aprovechamiento de agua subterránea salada mediante tecnología no convencional para casos de emergencia por sequía, Chaco Central Paraguay**. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Catamarca, Argentina, 2016.

FARIÑA LARROZA, S. (2001). **Proteção da Água Subterrânea Freática na Área Urbana Rural de Neu Halbstadt (Chaco-Paraguai)**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências - USP, São Paulo, 2001.

FATONE, F.; BATTISTONI, P.; PAVAN, P.; CECCHI, F. **Long-term operation of a full scale intermittent MBR**. The 8th International Conference on Chemical and Process Engineering (ICheaP-8). 24-27 Junho 2007. Disponível em: <http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/icheap8-pres07/icheap8webpapers/75%20Fatone.pdf>. Acesso em 01 junho 2020.

FESENKO, L.N.; PCHELNIKOV, I.V.; FEDOROV, R.V. Analysis of Economic Efficiency of Production of Low-Concentrated Sodium Hypochlorite by Direct Electrolysis of Natural Waters. **ICCATS 2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, vol.262, doi:10.1088/1757-899X/262/1/012185, 2017.

FLATHE, H; BENDER, F.; LÜDERS, R.; GUSKE, O. Resultados de las Investigaciones Hidrogeológicas, Geofísica y Edafológicas en el Chaco Boreal-Paraguay. **Bundensanstalt für Bodenforschung**, Hannover-RFA, p. 34, 1959.

FLUODER. **Indústria Química Fluoder S.A.** Disponível em: <https://www2.fluoder.com.py/>. Acesso em 01 junho 2020.

FRANCO LEON, D. R.; CAVALIERO, C. K. N.; DA SILVA, E. P. Technical and economical design of PV system and hydrogen storage including a sodium hypochlorite plant in a small community: Case of study of Paraguay. **International Journal of Hydrogen Energy**, 45, p. 5474–5480, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.059>.

FRANCO LEON, D. R.; FRUTOS DOLDÁN, M. A. **Confiabilidad del suministro eléctrico en la industria plástica electrointensiva INPET**. Trabalho de Conclusão de Curso – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción - FIUNA, San Lorenzo, Paraguay, 2008.

FURLAN, A. L. **Análise Técnica e Econômica do Uso do Hidrogênio como Meio Armazenador de Energia Elétrica Proveniente de Fontes Eólicas**. Tese (Doutorado):Faculdade de Engenharia Mecânica–FEM, Programa de Planejamento de Sistemas Energéticos,Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2012, p.102, 2012.

ESPINOLA, M. O. G. **Análise Técnica e Econômica da Produção de Hidrogênio Eletrolítico no Paraguai**. Tese (Doutorado): Faculdade de Engenharia Mecânica–FEM. Programa de Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brasil, p.142, 2013.

GAMBETTA, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Mecânica–FEM. Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brasil, p.163, 2010.

GHASEMZADEH, K.; HARASI, J. N.; AMIRI, T. Y.; BASILE, A.; IULIANELLI, A. Methanol steam reforming for hydrogen generation: A comparative modeling study between silica and Pd-based membrane reactors by CFD method. **Fuel Processing Technology**, Vol. 199, 2020, 106273, ISSN 0378-3820. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106273>.

GODOY, E. **Ocurrencia, Calidad y Propuesta de Estratificación de las Aguas Subterráneas del Chaco Paraguayo**. Publicação do Departamento de Agua para el chaco (CNDRICh). Recursos Naturales: Geología – Hidrología, Filadelfia – Paraguay, n.2, p. 27 – 44, 1989.

GODOY, G. A. R. **Aproveitamento da energia vertida turbinável da UHE Itaipu para uso em ônibus a hidrogênio: estudo de caso em Foz do Iguaçu**. Dissertação (Mestrado): Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM, Programa de Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, p. 105, 2008.

GOOGLE Maps, **Subestación Eléctrica - Loma Plata** (Coop. Chortitzer). Disponível em: <https://www.google.com/maps>. Acesso em: 24 abril 2020.

GOTZE - Ingeniería. **Transformadores Monofásicos y Trifásicos**. Transformador trifásico ROMAGNOLE 200kVA. Disponível em: <http://www.gotze.com.py/categoria-producto/transformadores-monofasicos-y-trifasicos/>. Acesso em: 26 abril 2020.

GRUNDFOS. Product Center. **Dimensionamento**. Disponível em: <https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?qcid=960040626>. Acesso em: 15 abril 2020.

GUY LE DALL. **Apparatus for the Uninterrupted Treatment of a Liquid with Ion Exchange Resins**. Official Gazette of the United State Patent and Trade Office. Vol. 1045, n.4, 28 Agosto, 1984, p. 1692, 1984.

HAFEZ, A. A., *et al.* Technical and Economic Feseability of Utility-Scale Solar Energy Conversion Systems in Saudi Arabia. **Research Paper.Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering**. 03 July 2019. Online doi: <https://doi.org/10.1007/s40998-019-00233-3>.

HARDER, W. **Captación y almacenamiento de Agua de lluvia**. Seminario–Taller sobre la gestión del Agua, Cruce Pionero, Julio del 2017.

HATTA, M. **Estudio del comportamiento de la napa freática en la zona de Filadelfia de la región del Chaco en la República de Paraguay**. Santiago, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO/RLAC, p. 39, 1989.

HOSSEINPOUR, M.; SAHOO, M.; PEREZ-PAGE, M.; BAYLIS, S. R.; PATEL, F.; HOLMES, S. M. Improving the performance of direct methanol fuel cells by implementing multilayer membranes blended with cellulose nanocrystals. **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 44, n. 57, p. 30409-30419, 2019. ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.194>.

INGENIERIAQUIMICA.ORG (2010).Foros. **Calculo de Ablandador**. Disponível na internet em: <http://www.ingenieriaquimica.org/foros/calculo-ablandador-agua>. Acesso em 29 de fevereiro 2020.

IRANI, R. Hydrogen Storage: High-Pressure Gas Containment. **MRS Bulletin**, 27(9), p. 680-682, 2002. DOI:10.1557/mrs2002.22.

ITAIPU, ITAIPU BINACIONAL. **Planta de energía solar inaugurada por ITAIPU en Lagerenza beneficiará a unas 2.900 personas**, 16 janeiro 2019. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/es/sala-de-prensa/noticia/planta-de-energia-solar-inaugurada-por-itaipu-en-lagerenza-beneficiara-unas-2>. Acesso em: 06 de fevereiro 2020.

ITAIPU, ITAIPU BINACIONAL. **Se presentó la prospectiva energética al 2040, para lograr sustentabilidad**, data 21 de novembro de 2016. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.py/es/sala-de-prensa/noticia/se-presento-la-prospectiva-energetica-al-2040-para-lograr-sustentabilidad> . Acesso em: 22 de setembro de 2019.

KALANTARI M. H.; MALEKZADEH A.; EMANI A. The effect of disinfection with sodium hypochlorite 0.5% on Dimensional Stability of Condensation Silicone Impression Materials of Speedex and Irasil. **Journal of dentistry**. Shiraz University Medical Science, vol 15, n.3, p. 98-103, 2014.

KLORIGEN. **On-site Chlorine and Sodium Hypochlorite Generation**. Electrolytic Technologies Corporation Technical. Products. North Miami Beach, FL, 2010. Electrolytic Technologies Corporation. Disponível em: <https://electrolytictech.com/>. Acesso em 30 junho 2020.

KOHLI, D. K.; KHARDEKR, R. K.; SINGH, R.; GUPTA, P. K. Glass micro-container based hydrogen storage scheme. **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 33, n.1, 2008, p. 417-422, ISSN 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.044>.

KORDESCH, K.; SIMADER, G. **Fuel cells and their applications**, p. 389, VCH Publishers, Alemanha, 1996.

KRUCH, W.; ROJAS, C. Observaciones del sistema fluvial y de la meteorología en el Chaco Paraguayo y alrededores. In: **Congreso Geológico de Bolivia**, 12, Tarija, Bolivia, 1996. Memorias. Tarija, Sociedad Geológica Boliviana, t.3, p. 1055-1066, 1996.

KUMAR, S. S.; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. **Materials Science for Energy Technologies**, Vol. 2, n.3, 2019, p. 442-454, ISSN 2589-2991, <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>.

LAN, R.; IRVINE, J. T. S.; TAO, S. Ammonia and related chemicals as potential indirect hydrogen storage materials. **International Journal of Hydrogen Energy**, Vol. 37, n.2, 2012, pp. 1482-1494, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.004>.

LENNTech. **Tratamiento y purificación del agua. Tratamiento de Salmuera**. Estanque de evaporación de Salmuera. Disponível em: <https://www.lenntech.com/data-sheets/Brine-Evaporation-Ponds.pdf>. Acesso em 30 junho 2020.

LINARDI, M. (2010). **Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível**. Artliber Editora Ltda. ISBN: 978-85-88098-52-7.

LINDSTROM, F.; RIVEROS, G.; RIVAROLO, M.; AREVALOS, G. **Assessment of a solar plant solution interconnected to national grid system in Paraguay**. E3S Web of Conferences **113**, N° 01010, Vol. 1, SUPEHR19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911301010>. Acesso em: 04 agosto 2020.

MAGNA-POWER. Serie MT **Fuente de Alimentación CC Programable**. Disponível em: <https://magna-power.com/es/products/magnadc/mt>. Acesso em: 26 abril 2020.

MECALOR. Home. **Produtos / chillers**. Disponível em: <https://mecalor.com.br/es/chillers/>. Acesso em: 04 abril 2020.

MENTE, A. **Groundwater Investigations in Central and Northwestern Chaco**. UNDP – MDN, Project PAR-69-516. Filadelfia, Paraguay, p.61, 1973.

MENTE, A.; GODOY, E. **Recursos de Aguas Subterráneas del Paraguay**. Publicação do Departamento de Agua para el chaco (CNDRICh). Recursos Naturales: Geología – Hidrología, Filadelfia – Paraguay, n.6, p. 82-89, 1989.

MIOX, Electrochemical Generation for Water Disinfection. MIOX Corporation. Products. On-site Generation. Disponível na internet em: <https://www.miox.com/products/on-site-generation/>. Acesso em: 15 abril 2020.

MOTTA, R. da R., CALÔBA, G. M. **Análise de Investimentos: Tomada de Decisão em Projetos Industriais**. São Paulo: Atlas, 2002.

NAÇÕES UNIDAS. **Investigación y Desarrollo de Água Subterránea en el Chaco**. Informe Técnico. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Nueva York, USA, p. 93, 1978.

NAÇÕES UNIDAS. **MEMORIA DEL MAPA HIDROGEOLOGICO DE LA REPUBLICA DEL PARAGUAY**. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Departamento de Cooperación Técnica para el Desarrollo. Comisión Nacional de Desarrollo Regional Integrado del Chaco. 1986.

NITSCH, M.; HOFFMAN, R.; UTERMAM, J.; PORTILLO, L. **Soil salinization in the Central Chaco of Paraguay; a consequence of logging. Towards sustainable land use, furthering cooperation between people and institutions** – Vol. I. Advances in Geo-Ecology, International Society of Soil Science (ISSS), 31, p. 495 – 501, 1998.

NREL, National Renewable Energy Laboratory. U.S. solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2017. **Commercial PV Levelized Cost of Energy Historical Trends**, 32p. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2018.

NREL. The National Renewable Energy Laboratory (NREL). **Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs**, fevereiro 2016. Disponível em: <https://www.nrel.gov/analysis/tech-lcoe-re-cost-est.html>. Acesso em: 13 julho 2020.

OEC - The Observatory of Economic Complexity- MIT. Products. Disponível em: <https://oec.world/en/>. Acesso em: 01 mar. 2020.

OWENS, D. Practical principles of ion Exchange water treatment. USA. Tall Oaks Pulishing Inc, 1995.

PDC (2020). PDC Machines. Produtos. Compressores de Diafragma. Catálogo. Disponível em: <https://pdcmachines.com/>. Acesso em: 30 jun. 2020.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7th Edition, McGraw-Hill, p. 2656, 1997. ISBN: 9780070498419.

PETERS, M. S. et al. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. Quinta Edição. Ed. Mac Graw Hill, p. 988, 2003.

PROTANK. Sodium Hypochlorite Storage Tanks & Specifications. Disponível em: <https://www.protank.com/sodium-hypochlorite>. Acesso em: 24 abril 2020.

PTI, Parque Tecnológico Itaipu- Paraguai. Plantas Solares generan beneficios en el Chaco, 2019. Disponível em: <http://www.pti.org.py/news/plantas-solares-generan-beneficios-en-el-chaco/>. Acesso em: 06 de fevereiro 2020.

PURE ENERGY CENTRE. Hydrogen Compressor. Disponível em: <https://pureenergycentre.com/hydrogen-compressor/>. Acesso em: 24 abril 2020.

PVSYST. Photovoltaic Software. PVSYST S. A., Route de la Maison-Carrée 30 - 1242 Satigny, Suíça. (Versão de prova 7.0.5). Download. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/>. Acesso em: 08 julho 2020.

QUIMINET, Quiminet.com. Información y Negocios segundo a segundo. **Producto, hipoclorito de sodio**. Precio, 2017. Disponível em: www.quiminet.com. Acesso em 30 junho 2020.

RAISTRICK, I. D. **Electrode assembly for use in a solid polymer electrolyte fuel cell**. Depositante: Ian D. Raistrick. US Patente N° 4.876.115. Depósito: 03 março 1988. Concessão: 24 outubro 1989.

RAMADAN, A.; ELISTRATOV, V. Techno-Economic Evaluation of a Grid-Connected Solar PV Plant in Syria. **Applied Solar Energy**, Vol. 55, n.3, pp. 174–188, 2019. Allerton Press, Inc. DOI: 10.3103/S0003701X1903006X.

REN, J., *et al.* Sustainability Decision Support Framework for the Prioritization of Hydrogen Energy Systems. In: A. Scipioni, J. Ren, & A. Manzardo (Eds.), **Hydrogen Economy: Supply Chain, Life Cycle Analysis and Energy Transition for Sustainability**, p. 225-276, 2017. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811132-1.00009-2>.

ROHN & HASS Company. Ion Exchange in water treatment. USA, 1988.

ROY, D.; SAMANTA, S.; GHOSH, S. Performance assessment of a biomass-fuelled distributed hybrid energy system integrating molten carbonate fuel cell, externally fired gas turbine and supercritical carbon dioxide cycle. **Energy Conversion and Management**, Vol. 211, 112740, 2020. ISSN 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112740>.

SAITO, N. **The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies** (2018). World Maritime University. Dissertação de Mestrado. 618. Disponível em: https://commons.wmu.se/all_dissertations/618. Acesso em 30 agosto 2020.

SAMMES, N.; BOVE, R.; STAHL, K. Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, Vol. 8, Issue 5, p. 372-378, 2004, ISSN 1359-0286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2005.01.001>.

SEDECO, Secretaria de Defensa del Consumidor y el Usuario. Publicaciones. **Monitoreo de la Canasta Familiar**. Año 2017. Disponível na internet em: <http://www.sedeco.gov.py/>. Acesso em 30 junho 2020.

SEINETECH. Solar water pumping. Disponível em: <http://seinetech.com/es/>. Acesso em: 18 Maio 2016.

SEMARNAT (2010). Secretaria De Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. **Planta de hipoclorito de Sodio**. Disponível em: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/jal/estudios/2007/14JA2007I0003.pdf>. Acesso 01 jun. 2020.

SEVERN TRENT SERVICES. Electrochemical Disinfection Capabilities, Statement of Qualifications. Torrance, CA, Severn Trent Services — Severn Trent DeNora, 2007.

SIEMENS WATER TECHNOLOGIES. US Filter, Wallace & Tiernan OSEC On – Site Hypochlorite Generation System. Vineland, NJ : Siemens Water Technologies, 2003.

SINGHAL, S. C. Solid Oxide Fuel Cells. **The Electrochemical Society Interface**, 2007. Disponível em: https://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr07/wtr07_p41-44.pdf. Acesso em 23 junho 2020.

SINGHAL, S. C.; KENDALL, K. **High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications**. Elsevier, Oxford, UK, p. 406, 2003.

SODECA. Ventiladores para atmosferas explosivas. Extractor cubierta multifuncional HTMF. Catálogo. Disponível em: https://www.sodeca.com/E-mailing/TARIFA_2018/Sodeca_tarifa_2018_ES.pdf. Acesso em: 17 abril 2020.

SØRENSEN, B.; SPAZZAFUMO, G. Hydrogen and Fuel Cell, 3rd Edition. **Emerging Technologies and Applications**. Academic Press, 2018, ISBN: 9780081007082, p. 502.

SPV Market Research. **Photovoltaic Manufacturer Shipments: Capacity, Price & Revenues**, 2019.

STOCK, Stock Supermercados. Limpieza. Hogar. Lavandina. Disponível em: <http://www.stock.com.py/category/877-lavandinas.aspx>. Acesso em: 28 fev. 2020.

STRÖBEL, R.; GARCHE, J.; MOSELEY, P. T.; JÖRISSEN, L.; WOLF, G. (2006). Hydrogen storage by carbon materials. **Journal of Power Sources**, Vol. 159, n.2, 2006, p. 781-801, ISSN 0378-7753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.03.047>.

SUNPOWER. Performance Panel for Commercial Installations. SunPower P19-410-COM. 2019 Disponível em: https://www.sunpowercorp.co.uk/sites/default/files/2019-11/sp_P19_410_COM_MC4_1m_Cable_1kV_CU_ds_en_a4_532379.pdf. Acesso em 05 agosto 2020.

SZIKSZAY, M. (2020). Geoquímica das águas. Disponível em file:///C:/Users/Carla/Downloads/45351-Texto%20do%20artigo-54095-1-10-20121002.pdf Acesso em: 13 abril 2020.

UNESCO/CPRM. Mapa Hidrogeológico de América del Sur 1:5000000. Texto explicativo, p.210, 1996.

VALENCIA, L. L.; RODRIGUEZ RIVAS, E. N. **Modificación del Sistema de Tratamiento de Agua en el Laboratorio Roxfarma para eliminar la presencia de coliformes totales y salmonella.** Trabajo Final Graduación: Ingeniería Química, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, p.124, 2008.

VARKARAKI, E. IEA/HIA Case study on the wind-hydrogen plant of RES2H2 in Greece. **Reporte técnico**, Dezembro 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282073575_IEAHIA_Case_study_on_the_wind-hydrogen_plant_of_RES2H2_in_Greece. Acesso em 30 jun. 2020.

VERLEK (2020). Resinas. Ficha Técnica. Disponível em: <https://verlek.com/resinas/>. Acesso 22 jun. 2020.

VERLEK. Verlek Industria & Química Tecnologia para Control Ambiental. Resinas de intercambio catiónicas e iónicas (2019). Disponível em: <https://verlek.com/2019/02/16/resinas-cationicas-y-anionicas/>. Acesso em: 30 jun. 2020.

VIELSTICH, W.; LAMM, A.; GASTEIGER, H. A. **Handbook of fuel cells – fundamentals, technology and applications**, v.1, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

VMME, Viceministério de Minas y Energía. Ministerio de Obras Públicas e Comunicaciones MOPC. Paraguai. **Balance Energético Nacional 2017**, 2017. Disponível em: <http://www.ssme.gov.py/vmme/>. Acesso em: 13 de out. 2018.

VON HOYER. Hidroquímica del agua subterránea en el área urbana de Filadelfia (Chaco Boreal/ Paraguay) Filadelfia – Chaco (Py), DRH/BGR, p.50, 1993.

WEG. Guía Práctico de Capacitación Técnico Comercial WEG. Motor Eléctrico. Módulo I. Disponível em: www.weg.net. Acesso em: 13 abril 2020.

WEITKAMP, J.; ERNST, S.; BOCK, T.; KISS, A.; KLEINSCHMIT, P. Introduction of noble metals into small pore zeolites via solid state ion exchange. **Studies in Surface Science and Catalysis**. Ed. Elsevier, Vol. 94, 1995, p. 278-285, ISSN 0167-2991, ISBN 9780444820495. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(06\)81233-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(06)81233-4).

Wood Mackenzie and SEIA. **U.S. Solar Market Insight 2018 Year-in-Review**. Boston, MA: Wood Mackenzie and Solar Energy Industries Association, 2019. Disponível em:

<https://www.seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-2018-year-review>. Acesso em: 13 julho 2020.

XIA, Z.; ZHANG, X.; SUN, H.; WANG, S.; SUN, G. (2019). Recent advances in multi-scale design and construction of materials for direct methanol fuel cells. **Nano Energy**, Vol. 65, 2019, artigo 104048, ISSN 2211-2855. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104048>.

YOURFREETEMPLATES.COM. Plantilhas de America. South America, Paraguay (2019). Disponível em: <https://yourfreetemplates.com/>. Acesso em: 23 fev. 2020.

ZHANG, JIN Z.; LI, J.; LI, Y.; ZHAO, Y. **Hydrogen generation, storage, and utilization**. Editorial Wiley-Science Wise Co-Publication, pp. 208, 2014. ISBN: 9781118140635.

ZÜTTEL, A. Hydrogen storage methods. **Naturwissenschaften** **91**, p. 157–172, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>.

ANEXO A- Especificação do tipo de água e localização, lagoas e poços na região Yacaré Sul

Fonte: Cristaldo et al. (2002)

<i>Laguna Curuca</i>							
<i>Localização: Noreste de Loma Plata (centro)</i>							
Poço/ Lagoa	X(m) Zona21 ³²	Y(m) Zona21	N.E.(m)	TDS (K1=0,831)	T (°C)	Classificação química	Tipo de água
Poço 1	20-8546 E	75-09780 N	1,95	39057	26,7	Cloretada Sódica Sulfatada	Salgada
Poço 2	20-8573 E	75-09817 N	0,95	29583	25,5	Sulfatada Sódica Cloretada	Salgada
Lagoa	20-8573 E	75-09817 N	-	39140	-	Cloretada Sódica Sulfatada	Salgada
<i>Lagoa Isla Po'i</i>							
<i>Ubicação: Entre Lagoa Curacao e Capitán, ao Leste</i>							
Poço/ Lagoa	X(m) Zona 21	Y(m) Zona21	N.E. (m)	TDS	T (°C)	Classificação química	Tipo de água
Poço 1	21-8691 E	75- 09228 N	0,42	4538	26,7	Cloretada Sódica Sulfatada	Salobre
Poço 2	21-8511 E	75- 09180 N	1,0	41300	24,0	Cloretada Sódica Sulfatada	Salgada
Lagoa Norte	21- 8691 E	75- 09-232 N	-	76368	16,6	Cloretada Sódica Sulfatada	Salgada
<i>Lagoa Capitán</i>							
<i>Ubicação: Entre as Lagoas Isla Po'i e Ganso</i>							
Poço/ Lagoa	X(m) Zona21	Y(m) Zona21	N.E. (m)	TDS	T (°C)	Classificação química	Tipo de água
Poço 1	22-3888E	75-05798N	0,30	49860	24	Cloretada Sulfatada Sódica	Salgada

³²Definição UTM, das coordenadas geográficas (X, Y) dentro das Zona 20 e Zona 21 correspondente ao Mapa do Chaco dividido em quadrantes. Fonte: GAUSS-KRÜGER.

Poço 2	22-4917E	75-04862N	2,4	45705	24,7	Cloretada Sulfatada Sódica	Salgada
Lagoa esquerda	22-3898E	75-05780N	-	93487	19,7	Cloretada Sulfatada Sódica	Salgada

Lagoa Ganso

Ubicação: Inmediações das lagoas (Estância Bartel)

<i>Poço/ Lagoa</i>	<i>X(m) Zona 21</i>	<i>Y(m) Zona21</i>	<i>N.E. (m)</i>	<i>TDS</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Classificação química</i>	<i>Tipo de água</i>
Poço 1	22- 8437E	75-03353N	0,70	46868	26,1	Sulfatada Sódica Cloretada	Salgada
Poço 2	22-8511E	75-03486N	3,60	54015	27,4	Cloretada Sódica Sulfatada	Salgada
Lagoa direita	22-8435E	75-03353N	-	153153	20,7	Cloretada Sódica Sulfatada	Salmoura
Lagoa esquerda	22-8424 E	75-03440N	-	143264	25,4	Cloretada Sódica Sulfatada	Salmoura

Lagoa Campo Maria

Ubicação: borde da Lagoa

<i>Poço/ Lagoa</i>	<i>X(m) Zona 21</i>	<i>Y(m) Zona21</i>	<i>N.E. (m)</i>	<i>TDS</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Classificação química</i>	<i>Tipo de água</i>
Poço 1	25-8472 E	74-96141 N	0,53	3656	26,6	Cloretada Sódica Sulfatada	Salobre
Lagoa	25-8472 E	74-96630 N	-	179	22,6	Bicarboneto Cálcico Cloretada	Doce

Lagoa Rojas Silva

Ubicação: borde da Lagoa

<i>Poço/ Lagoa</i>	<i>X(m) Zona 21</i>	<i>Y(m) Zona21</i>	<i>N.E. (m)</i>	<i>TDS</i>	<i>T (°C)</i>	<i>Classificação química</i>	<i>Tipo de água</i>
Poço 1	28-9781 E	75-96141 N	0,55	21522	26,5	Sulfatada Cloretada Sódica	Salgada

Lagoa	29-9781 E	75-96140 N	.	3540	23	Cloretada Sódica Sulfatada	Salobre
-------	-----------	------------	---	------	----	----------------------------------	---------

Puerto Pinasco

Ubicação: *Beira do rio Paraguai*

Poço/ Lagoa	X(m) Zona21	Y(m) Zona21	N.E. (m)	TDS	T (°C)	Classificação química	Tipo de água
Poço 1	41-3504E	74-95203N	3,80	661	28,5	Bicarboneto. Cálcica	Doce
Poço 2	41-3420E	74-95200N	4,47	6082	27,2	Cloretado Sódica Sulfatada	Salobre
Água do Rio PY	41-3515E	74-95203N	-	59	26	Bicarboneto cálcico	Doce

Riacho Yacaré

Ubicação: Embaixo da Ponte

	X(m) Zona21	Y(m) Zona21	N.E. (m)	TDS	T (°C)	Classificação química	Tipo de água
Riacho Yacaré	39-2075E	74-96619N	-	8268	25,4	Cloretada Sódica Sulfatada	Salobre

ANEXO B- Lagoas e poços Riacho Yacaré Sul. Estudo físico-químico

Fonte: Cristaldo et al. (2002)

Pozo	pH	C.E.	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Sr	Li	NH4	B	Cl	SO4	CO3	HCO3	NO3	NO2	PO4	SiO	F
Laguna Curacao																					
Pozo 1	7,19	47000	13404	122	740	823	0,2	0,3	6	0,44	1,55	36	16224	10125	<1	544	6	0,4	0,26	44	0,4
Pozo 2	7,27	35600	7771	28	570	579	0,3	0,2	3,1	0,83	1,12	31	7555	8321	<1	706	23	0,6	0,87	51	0,3
Laguna	8,47	47100	10326	66	888	771	1,46	0,62	8,4	0,46	1,36	39	12569	9007	3,8	495,2	12	0,05	0,98	48	0,2
Laguna Isla Poi																					
Pozo 1	7,17	5.461	892,5	20,7	251,3	84,5	0,1	0,1	0,7	0,09	1,08	6	1.337	743	<1	180,1	0,7	0,08	0,08	59,3	0,3
Pozo 2	7,5	49.700	15031	118	621	929	0,6	0,8	8,5	0,66	1,95	36	17.202	12.526	<1	620,1	7,3	0,05	0,28	29	0,3
Lag Norte	8,59	91.900	17761	88	1063	2054	1,58	0,88	9,1	1,38	1,94	86	21.716	15.697	6,4	705	15,2	0,86	1,09	31	0,4
Lag.Sur	8,56	71300	14741	57	652	1122	1,62	0,73	3,4	1,41	1,17	42	14401	15940	7,8	923	16,8	0,09	0,31	33	0,5
Laguna Capitan																					
Pozo 1	7,33	60000	11542	37	682	1011	0,9	0,7	3,9	1,3	0,91	46	11917	11722	<1	673,6	1,2	0,18	0,63	36	0,2
Pozo 2	7,35	55000	11319	64	773	784	1,36	0,63	8,5	0,48	1,36	14	13302	9353	<1	569,3	11,2	0,06	0,21	52,3	0,4
Lag.Izquierda	8,89	112500	27768	88	1564	2578	1,94	0,92	9,8	2,33	1,84	92	33786	22851	15	623,5	3,9	0,88	0,86	48	0,3
Laguna Ganso																					
Pozo 1	7,46	56400	10588	49,2	722	888,4	0,88	0,91	2,9	1,19	0,16	44	10587	11473	<1	658	13,2	0,24	0,44	23,9	0,1
Pozo 2	7,14	65000	11602	56,2	743	902	0,91	0,83	3,2	1,08	0,24	52	13521	9782	<1	622,3	11	0,32	0,81	25,5	0,3
Lag.Derecha	8,4	184300	32626	107	1837	2779	0,92	0,84	3,9	2,55	1,59	47	41002	26611	<1	717,2	7,9	0,88	0,87	27,7	0,2
Lag.Izquierda	8,17	172400	29995	123	1759	2856	0,7	0,61	2,3	1,83	1,89	53	36594	25193	<1	696	6,1	0,78	0,54	31,1	0,4
Ea.Campo Maria																					
Pozo 1	8,19	4440	802,2	16	202,8	91	0,1	0,1	0,5	0,06	0,83	5	1287,4	701,2	<1	186,2	1,2	0,06	0,07	48,3	0,5
Lag.Campo Maria	7,67	216	16	3,2	29,22	5,3	0,06	0,09	0,1	0,02	0,06	0,1	26,8	12,3	<1	88,3	5,1	0,08	0,05	28	0,1
Laguna Rojas Silva																					
Pozo 1	7,24	25.900	6620	22	504	519	0,2	0,3	0,5	0,66	1,06	29,9	7.143	7.685	<1	756	15	0,04	0,75	23	0,3
Agua de Lag.	8,59	4260	756	12	222	88	0,1	0,1	0,6	0,07	0,73	4	1.198	605	9,2	178	0,9	0,05	0,06	28,9	0,5
R.Yakare	7,7	9950	2006	24,1	384	80	0,8	0,5	0,7	0,08	0,18	8,2	3031,1	805,2	<1	536	5,4	0,08	0,19	42	0,3
Puerto Pinasco																					
Pozo 1	7,58	796	41,6	8,3	82,3	22,2	0,1	0,1	0,2	0,03	0,22	5,2	12,5	30,8	<1	398	1,1	0,05	0,07	41,3	0,2
Pozo 2	7,23	7320	1269	9,8	305	78	0,2	0,1	0,6	0,07	0,13	7,8	2009,3	606,9	<1	368,7	2,9	0,07	0,08	56	0,3
Agua del Rio Paraguay	7,25	71	1,1	0,6	14,3	1,8	<10	<10	0,1	0,01	0,11	0,1	2,6	1,8	<1	47,2	0,4	0,02	0,02	22	0,1

ANEXO C- Profundidade dos poços perfurados para pesquisa no Chaco Central – (1993-1994)

Fonte: Cristaldo (2002).

(Auger -15/11 -02/12 de 1993), rotativa (09/10 - 15/04 de 1994)

N° de poço	Localização	UTM-ZONA 20		Cota (m.s.n.m.)	Diam. (poleg.)	Prof.(m) final	N.E. (m) sup.
		X	Y				
DRH-A-29LP0442	Gondra e Cacique Guazu	207010	7521409	129,010	5	14,9	4,76
DRH-A-29LP0443	Gondra e Monte-I	207448	7521409	129,350	5	11,5	4,61
DRH-A-29LP0444	Gondra/E 74 m de Steinbach	207754	7521409	129,478	5	13,0	
DRH-A-29LP0445	Gondra/E 177 m de Monte-I	207625	7521409	129,098	5	7,0	
DRH-A-29LP0446	Gondra/E 109 m de Monte-I	207556	7521416	128,819	5	8,6	4,67
DRH-A-29LP0447	Gondra/W 198 m de Cacique Guazu	206820	7521410	128,893	5	16,0	4,17
DRH-A-29LP0448	Gondra/W 200 de Santa Cruz	206384	7521412	128,533	5	10,0	4,80
DRH-A-29LP0449	Enmanuel e Bella Vista	208112	7523145		5	17,5	
DRH-A-29LP0450	Gondra e Central	207969	7521409	130,586	5	22,0	7,10
DRH-A-29LP0451	Paz del Chaco e Central	207945	7522025	130,592	5	8,5	
DRH-A-29LP0452	Central/N 93 m de Tres Palmas	207935	7522206	131,382	5	5,5	
DRH-A-29LP0453	Central/frente museo Menno	207945	7522271	131,113	5	22,0	4,57
DRH-A-29LP0454	Central/N 5 m de 11 de Junio	207835	7523503	129,896	5	22,0	5,00
DRH-A-29LP0455	Gondra/J. B. Reimer	208683	7521407	131,873	5		
DRH-A-29LP0456	J.B. Reimer/N 94 m de Nacional	208856	7522006		5	7,0	
DRH-A-29LP0457	J.B. Reimer/S 30 m de C. Casado	208633	7522209	132,033	5	10,0	5,86
DRH-A-29LP0458	Gondra e Elim	209312	7521420	132,163	5	12,0	5,60
DRH-A-29LP0459	Elim/S 10 m de Friedens	209221	7522074		5	14,5	
DRH-A-29LP0460	Berfeld/N 40 m de Gondra	210280	7521422	129,200	5	11,5	4,98
DRH-A-29LP0461	Berfeld/N 600 m de Gondra	210279	7522005	129,900	5	11,5	5,26
DRH-A-29LP0462	Berfeld e F. Engen	210269	7522507	129,938	5	19,0	6,16
DRH-A-29LP0463	F.Engen e Elim	209206	7522501	129,900	5	17,5	5,35
DRH-A-29LP0464	J. B. Reimer e F. Engen	208627	7522473	130,800	5	22,0	6,23
DRH-A-29LP0465	Santa Cruz e rua da fabrica	208599	7522450		5	19,0	4,44
DRH-A-29LP0466	Pozo dulce c/S rua Amistad	208551	7523649	129,011	5	16,0	4,40
DRH-A-29LP0467	Amistad/E 600 m de Pozo Dulce	209147	7523732	129,221	5	20,5	4,40
DRH-A-29LP0468	Pozo dulce e Eusebio Ayala	208598	7522991	128,509	5	11,5	4,20
DRH-A-29LP0469	E. Ayala/W de rua Paratodo	209152	7523016	129,000	5	12,6	4,42
DRH-A-29LP0470	Central/S 57 m de Cantero	207879	7522953	129,300	5	17,5	4,88
DRH-A-29LP0475	Fabrica (W 500 m de Central)	207551	7522562	129,020	6	30,0	4,14
DRH-A-29LP0476	E 100 m de Brunnen/N 200 m de F. Engen	208560	7522689	128,480	6	24,0	3,56
DRH-A-29LP0477	W 15 m de edelweis/N 200 de Engen	209352	7522705	129,140	6	24,0	4,27
DRH-A-29LP0478	E 44 m de Central/S 61 m de Bella Vista	207908	7523038	128,730	3	24,0	4,20
DRH-A-29LP0479	S de Beth-EI/W 100m de Campo-I	207337	7521658	129,080	3	14,0	3,69
DRH-A-29LP0480	S 39 m de E. Ayala/E 13 m de Pozo Dulce	208603	7522944	128,540	4	14,0	4,08
DRH-A-29LP0481	N 200 m de F. Engen/W 29 m de Sand	208969	7522689	127,720	3	13,6	4,86

Tabela 2.1 Dados técnicos dos poços perfurados para pesquisa no Chaco central
(Auger -15/11 -02/12 de 1993), rotativa (09/10 - 15/04 de 1994)

N° de poço	Localização	UTM-ZONA 20		Cota (m.s.n.m.)	Diam. (poleg.)	Prof.(m) final	N.E. (m) sup.
		X	Y				
DRH-A-29LP0482	E de la calle Central (Rotonda)	207956	7522612	129,480	3	29,0	3,70
DRH-A-29LP0483	E 21 m de rua Laguna/N 33 Laguna (E-W)	207428	7521994	129,240	3	10,5	4,00
DRH-A-29LP0484	N 28 m de F. Engen/W 11 m de Reimer	208610	7522495	130,500	3	17,0	5,65

Referências:

DRH-R-0475 = N° de poço perfurado com rotativa (PROMINAS)

DRH-A-0444 = N° de poço perfurado com AUGER

(m.s.n.m.) = altitude

Prof.total = profundidade final da perforação dos poços de estudos

Diám.(poleg) = diâmetro de perforação em polegadas.

N.E.(m) sup. = nível estático em metros da superfície

C.E. µS/cm = condutividade elétrica

ANEXO D- Análise físico-química Chaco Central

Fonte: Cristaldo (2002).

Tabela 1 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Filadelfia Out/Nov 1992)

Nº de Poços	pH	Cond.	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD
mg/L																					
MDN-343d	7,4	1525	28,3	46	0,01	292	11,9	2,4			25	678	168	22	1,2	0,76	0,46	0,55	50,5		1327,48
MDN-343e	7,21	2140	15	87	0,03	412	31,9	3,9			24	1110	263	1,5	0,15	0,28	0,66	1,4	64,1	0,3	2015,2
MDN-343a	7,38	1100	15,3	18	0,08	180	18,8	2,5			9	224	377	1,3	0,09	1,03	0,34	0,75	56	0,5	904,89
MDN-343c	7,1	895	12,6	10,8	0,07	137	14,9	1			17	120	334	1,6	0,04	0,61	0,62	0,4	58,1	0,3	709,4
MDN-343g	7,19	2430	16,9	44,5	0,12	554	38,5	6,7			5	1390	212	13,6	0,13	0,08	0,45	0,8	76,3	0,4	2359,48
MDN-343f	7,65	495	7	6,4	0,03	84	8,8	0,7			22	81	198	2,8	0,04	0,47	0,55	0,15	41,2	0,2	453,34
MDN-343b	7,42	610	14,2	8,2	0,04	82	10,6	0,9			4	122	188	1,6	0,02	0,68	0,49	0,25	59	0,3	492,28
20FF0039	7,6	1540	9,4	271	0,11	26,1	12,8	0,5	0,04	-0,01	131	118	473	29,9	-0,01	-0,01	2,4	2,4	83	1,5	1159,12
20FF0046	7,3	475	14,3	25	0,07	46,6	14,5	0,6	0,06	0,01	11	30,3	241	4,1	-0,01	0,01	1,5	0,53	94	0,5	484,07
20FF0073	6,52	5020	8,7	870	0,23	138	112	1,9	0,16	0,2	752	1170	237	250	0,07	0,11	1,78	4,3			3546,45
20FF0007	7,12	511	2,6	0,1	-0,01	88,6	12,9	0,8	0,07	-0,01	2,1	11,8	317	5,2	0,01	0,13	0,01	0,15	51,2		492,65
FAO-03	7,57	12100	37,7	2290	0,55	497	194	6,6			856	5010	533	53	1,43	0,05	-0,1		11,2		9490,43
FAO-04	7,89	4700	42,6	448	0,29	539	128	8,2			247	2220	295	34	1,26	0,07	-0,1	6,3	19,4		3989,02
FAO-05	7,82	19200	36,5	4100	0,71	460	326	7,5			2720	6780	722	3	0,13	2,4	-0,1	30,8	14,1		15203,04
FAO-06	8,15	22500	33,5	5100	0,87	370	323	5,7			3530	7500	701	-0,5	0,14	0,96	-0,1	33,6	9,9		17608,07
FAO-07	7,77	13600	44	2750	0,2	303	223	4,1			1890	4510	426	13,5	1	2,1	-0,1	20,8	9,5		10187,1
FAO-08	7,84	24900	27,5	5720	0,61	515	522	6,6			3380	9950	917	5,5	0,58	0,59	-0,1	34	11,9		21091,18
FAO-12	7,89	9920	32,5	1810	0,41	474	253	9,1			591	4550	809	5	0,15	1,36	-0,1	16,8	24,5		8576,72
FAO-13	7,68	24800	59	5580	1,2	515	430	8,6			4550	8000	539	16	1,7	1,14	-0,1	27,6	18,9		19748,04
FAO-14	7,43	21200	58	4290	0,14	511	426	9,3			3480	6850	731	29,5	0,18	0,32	-0,1	32,4	26,9		16244,64
FAO-32	7,68	12300	32	2360	0,65	309	286	6,4			1770	4160	472	28	0,32	0,09	-0,1	14,4	33,6		9472,36
FAO-22	7,57	31400	52	7420	1,29	433	538	9,3			4610	12000	638	7,5	0,72	4,1	0,6	38,4	12,7		25765,61
FAO-23	7,85	1230	24,3	1210	0,25	78	60	1,4			1020	1210	519	2,5	0,03	0,27	-0,1	1,28	25		4151,93
20FF0008	7,61	751	5,9	6	0,04	130	28,6	1,2	-0,01	-0,01	4,2	69,7	445	20,5	-0,01	0,08	0,01	0,33	55		766,53
FAO-63	7,22	17200	42,8	4030	0,89	253	270	1,6			2630	6200	494	6,4	1,03	1,02	0,33	20,8	13,1		13964,97
20FF0015	6,51	227	8,2	9,7	-0,01	22,2	8,2	0	-0,01	-0,01	3,3	7,5	126	1,5	0,01	0,04	0,71	0,14	43,4		230,88
20FF0011	7,66	913	9,5	49,2	0,05	106	27,2	1,1	0,26	0,04	10,1	112	400	46,5	-0,01	0,05	-0	0,75	56,2		818,93
FAO-65	7,42	26800	34,4	6600	1,38	510	357	3,9			3950	10600	691	26,5	0,73	0,16	0,18	40	21,1		22836,35
20FF0011	7,32	3850	17	410	0,19	364	46,9	2,4	-0,01	-0,01	87,2	1420	454	40,6	0,01	0,04	-0	0,75	54,4		2897,46
MDN-343e	7,3	2360	17,4	87,2	-0,01	419	36	2,2			17,1	1082	251	3,6	0,26	1,33	2,11	1,9	34		1955,09

Tabela 1 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Filadelfia Out/Nov 1992)

Nº de Poços	pH	Cond.	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD
mg/L																					
MDN-343d	7,32	2360	10,2	21,6	-0,01	594	14,8	2,7			2,2	1360	204	1,5	0,15	0,69	0,03	0,85	35,8		2248,51
MDN-343a	7,39	629	26,6	3,7	-0,01	105	9,3	0,7			1,7	148	214	1	0,06	1,22	0,78	0,42	26,2		538,67
MDN-343e	7,23	636	21,5	8,3	-0,01	88	12,1	0,4			6,1	61,2	304	-0,5	0,03	2,02	2,58	0,51	26,7		532,93
MDN-343g	7,35	2080	10,6	23,3	-0,01	485	31,6	3			2	1180	193	2,8	0,18	0,27	-0	0,7	34,2		1966,63
MDN-343f	7,72	448	4,1	-0,1	-0,01	84	6,4	0,5			0,9	82	177	1,9	0,12	0,2	-0	0,11	18		375,11
MDN-343b	7,31	476	49,2	6	-0,01	58,5	8,8	0,4			8,9	77,2	190	1,7	0,16	0,93	7,17	0,69	28,9		438,54
FAO-56	7,25	27900	41,8	6780	1,4	361	457	2,4			4930	9650	802	19,3	0,87	0,81	0,69	31,2	24,2		23102,67
FAO-60	7,2	24300	61,2	6240	1,34	294	353	1,8			2900	11200	703	30,1		0,97	0,87	37,2	19,9		21843,67
FAO-51	7,44	705	18,5	39,7	0,04	75,2	20,2	0,4			16	97	308	2,4	0,25	0,29	0,41	0,54	39,5		618,43
FAO-52	7,43	22200	30,2	5350	1,62	515	343	3,3			2700	9420	486	312	1,23	0,2	0,08	39	26,6		19228,23
FAO-53	7,41	14300	26,2	2950	0,8	542	181	3,6			2030	5080	417	119	0,35	0,31	0,9	18	44,6		11413,76
FAO-67	7,19	43800	42,1	12200	1,06	505	730	4,1			7830	18200	1292	19,8	1,44	0,48	0,34	52,4	28,1		40906,82
MDN-293m	7,42	3900	34,5	308	0,34	590	67,5	4,1			205	1900	380	1,6	0,23	0,91		2,9	70,9		3565,98
MDN-293r	7,51	3390	16	553	0,42	198	65	1,6			267	1040	573	-1	0,03	0,14		4,6	78,8		2796,59
MDN-293o	7,63	2480	37,7	232	0,3	258	62,5	2,2			133	840	520	-1	0,07	0,38		3	82,4		2170,55
MDN-293c	7,36	4640	35,7	681	0,48	262	118	3,6			513	1450	629	2,8	0,11	0,03		9,7	76,6		3782,02
FAO-25	7,48	4420	28,1	445	0,55	510	161	4,9			96,7	2530	334	17,6	0,25	0,29		5,5	45,1		4178,99
FAO-27	7,42	4910	32,3	685	0,51	468	107	5,2			318	2215	577	6,4	0,67	1,27		5,2	61,4		4482,96
FAO-28	7,82	1880	8,1	365	0,33	37	18	0,6			178	154	655	-1	0,33	0,2		1,4	55,8		1472,76
FAO-31	7,58	13700	28,8	3100	1,02	488	212	6,8			1230	6200	622	13	1,7	0,49		31	48,7		11983,51
FAO-33	7,41	8320	28,2	1500	0,67	528	186	8,8			510	4250	512	5	0,45	0,22		22,3	43,1		7594,74
FAO-34	7,45	11400	23,2	2340	0,63	552	152	8,2			1360	4700	370	72,2	0,42	0,7		13	42,9		9635,25
FAO-35	7,41	9200	21	1400	0,58	636	130	7,8			1210	2480	296	705	0,07	0,16		8,8	59,7		6955,11
FAO-37	7,41	5060	14,9	622	0,59	600	118	3,9			200	2600	424	59,2	0,66	0,12		7,3	49,1		4699,77
FAO-38	7,46	3540	18,2	187	0,49	630	74	6,5			65,6	1790	316	198	0,11	0,12		1,6	81		3368,32
FAO-40	7,57	16700	34	3590	1,05	530	335	7			2750	6540	16	33,4	0,37	0,21		11,6	47,7		13896,33
FAO-41	7,07	665	30,5	42,7	0,08	47,6	20,2	0,6			35,8	114	185	5,6	0,19	-0,01		0,65	39,6		522,51
FAO-42	7,28	4800	50,3	367	0,38	620	54	1,2			250	1660	371	315	0,31	0,34		2,9	56,4		3748,83
FAO-44	6,58	12400	18,8	2240	0,99	778	214	10			2020	4480	397	156	1,98	0,1		7,8	41,1		10365,97
FAO-45	7,42	8300	27,8	1440	0,76	540	208	11			605	3710	458	202	0,5	0,18		25,9	62,1		7291,04

Tabela 1 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Filadelfia Out/Nov 1992)

Nº de Poços	pH	Cond.	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD
mg/L																					
FAO-49	7,35	3720	25	368	0,62	608	163	9,9			64,8	2415	470	11	0,24	0,55		6,1	49,8		4192,01
20FF0037	7,3	290	6,3	27,4	0,08	16,1	8,5	0,2	-0,01	-0,01	6,7	17,8	136	2,5	0,01	-0,01	1,03	0,25	36,8		259,64
20FF0051	7,92	645	4,6	30,1	0,06	58	22,6	0,5	0,03	-0,01	25,2	77,8	205	37,3	0,01	-0,01	-0	0,22	44,2		505,57
20FF0052	7,68	1080	15,6	152	0,1	47	17,3	0,2	0,01	-0,01	42,4	161	354	12,7	0,01	-0,01	1,56	0,89	51,8		856,55
20FF0013	6,55	225	9,2	4,5	0,03	15,3	7,6	0,1	0,15	0,02	3,1	4,1	101	1,7	0,01	0,06	0,11	0,14	32,2		179,32
20FF0014	7,12	1940	31,5	74	0,21	330	32,1	2	0,47	-0,01	26,9	730	444	17,4	0,01	-0,01	-0	1,62	41		1731,16
20FF0054	7,17	2040	52,6	241	0,22	113	46	0,7	0,08	0,09	200	281	542	46,4	0,03	-0,01	0,75	1,96	55,7		1581,52
20FF0045	7,46	455	5,8	45,7	0,09	29,5	13,2	0,2	-0,01	0,01	10,1	28,2	232	3,8	-0,01	-0,01	1,44	0,32	49,6		419,93
20FF0080	7,37	9570	19,9	1860	0,87	356	131	2,6			1695	2680	363	59,1	0,07	0,1	0,03	9,5	63,3		7240,27
20FF0080	7,51	9070	33,2	1760	0,57	362	120	1,4			1550	2640	358	59	0,17	0,38	0,3	10,4	61,9		6957,32
20FF0081	7,53	12800	29,4	2760	0,87	490	186	2,2			1190	5670	509	17,7	0,1	0,1	0,74	17,4	59,9		10933,41
20FF0079	7,61	15600	36,6	3750	1,03	476	279	3,8			1120	8000	635	134	0,92	0,53	0,2	39	33		14509,08
20FF0081	7,53	11500	28,2	2520	0,75	49,4	160	2			1040	4250	501	20,4	0,21	0,14	0,14	15	53,4		8640,84
20FF0082	7,39	12200	22,9	2470	0,95	506	229	2,6			1840	4750	361	1,7	0,04	0,22	0,27	13	39,6		10237,28
20FF0082	7,63	13000	25,1	2610	0,98	538	228	2,6			1940	4770	363	3	0,55	0,26	0,24	13,6	41,9		10537,23
20FF0001	7,29	880	9,3	36,7	0,12	120	25,4	0,6	0,07	-0,01	10,8	188	324	19	0,01	-0,01	0,25	0,81	64,8		799,84
20FF0002	7,24	735	9,3	13,8	0,07	120	21,4	0,5	0,46	0,19	3	61	444	0,7	0,02	-0,27	-0	0,32	53,3		728,32
20FF0003	7,39	665	9,9	5,1	0,04	118	14,2	0,6	0,07	-0,01	4,1	61	373	3	0,01	0,12	0,17	1,04	34		624,34
20FF0004	7,14	380	13,8	31,9	0,02	29,4	8,9	0,2	1,56	0,72	7,4	31,2	190	0,4	-0,01	0,04	0,79	0,64	38,3		355,26
20FF0005	7,38	1650	4,7	210	0,16	94	39,2	0,6	0,16	0,01	10,2	568	305	2,7	0,04	-0,01	-0	1,04	47,8		1303,59
20FF0006	6,22	180	12,3	7,7	0,02	11,2	6,4	0,1	0,38	0,18	4,1	10,8	88,4	0,8	-0,01	0,01	1,45	0,16	29,4		173,39
20FF0007	7,18	570	9,1	1,2	0,05	89,6	16,5	0,5	-0,01	0,02	2,9	16,1	344	5,6	0,02	0,01	-0	0,15	50,2		535,93
20FF0008	7,43	790	7,1	16,1	0,13	107	29,1	0,6	-0,01	0,03	3,1	25,9	465	22,4	-0,01	0,06	-0	0,33	58,1		734,92
20FF0009	7,24	2170	16,9	290	0,28	120	52,3	0,8	0,02	0,04	107	588	344	137	0,15	-0,01	1,32	1,62	80,9		1740,32
20FF0010	7,26	1220	13,4	86,6	0,18	132	30,5	0,6	0,07	0,02	24,3	270	407	1,6	0,01	-0,01	0,65	1	62,6		1030,52
20FF0011	7,35	2380	22	220	0,27	279	44,4	0,4	-0,01	0,01	67,6	850	474	37,7	0,02	0,02	0,33	2,02	50,9		2048,66
20FF0012	7,47	1120	7,4	145	0,25	66	23,6	0,4	-0,01	0,02	19,2	164	478	0,5	-0,01	-0,01	0,23	1,5	67,5		973,57
20FF0016	6,3	155	10,6	2,2	0,01	10,9	5,1	0,1	0,11	0,03	5,9	2,1	73,2	0,8	0,01	0,03	0,24	0,04	17,7		129,07
20FF0017	7,8	3000	22,3	521	0,31	109	54,4	0,5	0,06	0,16	361	735	479	1,1	0,05	0,04	0,87	4,3	62,8		2351,89
20FF0043	8,93	441	2,2	92,4	0,02	6,5	3,4	-0	0,03	-0,01	4,8	62,5	180	0,8	0,01	0,05	3,85	0,63	33,8		390,88

Tabela 1 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Filadelfia Out/Nov 1992)

Nº de Poços	pH	Cond.	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD
mg/L																					
20FF0083	7,25	22800	28,4	5150	1,45	549	422	5			4270	7720	502	1,2	0,01	0,05	3,84	0,37	39		18692,32
20FF0083	7,25	22400	2,8	5010	1,45	541	410	5			4150	7300	554	2,1	0,05	0,08	0,05	0,33	34,6		18011,46
20FF0024	8,97	470	3,8	67,2	-0,01	13,7	2,1	0,1	0,17	-0,01	40,5	24,9	91	24,1	-0,01	-0,01	0,45	0,26	9,3		277,54
20FF0025	7,57	1510	8	213	0,1	74	26,8	0,8	0,12	-0,01	205	178	379	3,4	0,08	0,03	0,07	0,98	78,8		1168,17
20FF0036	7,17	6880	29,1	1100	0,51	307	168	1,9	-0,01	-0,01	1110	1940	401	1,1	-0,01	-0,01	0,5	7,1	70,7		5136,87
20FF0059	7,63	1010	5,4	75	0,07	78,6	24	0,8	0,07	-0,01	62,6	38,1	401	12,8	0,03	-0,01	0,06	0,45	79,4		778,36
20FF0060	7,68	670	5,6	45,2	0,05	54,6	22,9	0,7	-0,01	-0,01	36,3	65,2	260	3	0,01	-0,01	0,04	0,29	43,2		537,06
20FF0044	7,31	265	6,7	13,5	0,04	17,3	10,1	0,2	-0,01	-0,01	6,3	5,2	109	23,7	-0,01	-0,01	0,5	0,27	34,4		227,17
20FF0027	7,55	1390	11,8	206	0,12	76	25,7	0,7	-0,01	-0,01	117	181	496	5	-0,01	-0,01	0,24	1,34	79,4		1200,26
20FF0061	7,63	2490	22,5	306	0,23	132	70,2	1,5	-0,01	-0,01	105	870	305	8,2	-0,01	0,01	0,09	1,68	80,2		1902,58
20FF0042	7,67	500	4,7	79,2	0,11	29,6	9,7	0,1	-0,01	-0,01	11,5	23,8	226	81	-0,01	-0,01	1,27	0,77	42,4		510,11
20FF0063	7,51	825	5,2	46,8	0,09	76,4	26,6	0,8	0,02	-0,01	27,5	81,5	304	41,9	0,01	-0,01	0,05	0,29	49,7		660,84
20FF0022	7,54	5480	25,9	936	0,42	214	93	1	0,22	0,02	640	1610	485	40,4	-0,01	-0,01	0,16	6,3	73,8		4126,2
20FF0026	6,97	165	1,3	2,7	-0,01	15,7	3,9	0,1	0,73	0,08	7,1	5,8	55	5,6	0,05	0,18	0,1	0,03	4,6		102,96
FAO-66	7,13	1015	24,2	114	-0,01	58,5	24	0,4			88	144	310	0,7	0,06	1,66	0,24	1,76	26,5		794,01
FAO-68	7,32	15600	41,3	3400	0,76	535	256	2,9			1980	6200	544	37,4	0,69	0,89	0,23	65	36,3		13100,47
20FF0089	7,31	15700	19,3	3270	1,04	560	286	4,7			2170	5920	505	146	0,34	0,02	0,11	22,2	41,8		12946,51
20FF0062	7,16	1450	27,2	140	-0,01	101	41,8	0,3	-0,01	0,31	72,4	168	485	113	1,12	0,1	2,27	1,1	32,2		1185,78
20FF0087	7,29	7260	26,4	1310	0,49	494	147	3,4	0,07	0,16	371	3640	561	8,7	0,05	0,05	0,25	15,9	32,6		6811,07
20FF0089	7,24	13500	24,2	2960	-0,01	600	280	3,6			1760	5610	510	142	1,05	0,16	0,43	19	39,5		12149,93
20FF0042	7,84	570	4,7	105	-0,01	14,5	8,6	0,1	0,01	0,01	14,9	70	258	4,5	0,01	-0,01	0,92	0,79			482,02
20FF0064	7,37	1930	13,5	222	0,04	125	57	1,3	0,02	0,01	163	465	319	87	0,04	-0,01	0,41	1,18	79,4		1533,89
20FF0067	6,93	455	9,9	31,2	-0,1	46,2	7,7	0,2			6,8	91	146	2,1	-0,01	-0,01	1,04	0,53	30		372,55
20FF0069	6,28	235	7,3	12,1	-0,1	15,4	7,6	0,1	0,07	0,01	0,8	34,5	66,6	14,4	0,02	0,03	1,68	0,17	24		184,68
20FF0070	7,8	2000	51,5	268	0,1	110	45,7	0,7	0,01	0,01	156	385	563	45	0,02	-0,01	0,47	2	67		1694,5
20FF0065	7,16	2130	14,1	392	0,08	63	33,3	0,4	0,02	0,01	213	459	423	57	0,09	-0,01	0,65	4,3	38,9		1698,84
20FF0066	6,8	465	9	31,5	-0,01	48,1	9	0,3	0,02	0,01	7,7	99	143	1,5	0,03	-0,01	0,63	0,51	33		383,28
20FF0068	7,55	5800	17,4	978	0,39	174	98,2	2,1			551	1890	334	28,8	1,89	0,65	0,42	9,6	23,1		4107,55
20FF0019	7,34	2780	15,5	315	0,35	243	67,9	1,1			195	838	357	210	0,24	-0,01	0,1	3,9	60,7		2307,78
20FF0090	7,56	9080	21,8	1760	0,75	524	163	4,4			725	4350	427	104	0,08	0,08	0,96	26	30		8137,07

Tabela 1 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Filadelfia Out/Nov 1992)

Nº de Poços	pH	Cond.	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD
			mg/L																		
20FF0090	7,63	10200	16,7	2060	0,75	548	14,6	3,7			837	4160	418	92	0,11	0,25	0,1	25	37,7		8213,91
20FF0091	7,23	2650	75,2	203	0,14	215	115	2,6			187	689	643	61	0,26	0,39	2,85	19,2	39,8		2253,44
20FF0091	7,5	2620	74,1	178	0,12	230	92,9	2,1			187	565	662	30,8	1,21	0,19	0,45	15,6	38,7		2078,17
20FF0082	6,96	2230	19	113	0,27	329	63,4	1,9	1,36	0,07	90,6	762	497	20,3	0,11	-0,01	0,21	2,6	37,1		1937,91
20FF0020	7,16	1110	21,5	33,1	0,12	178	23,6	0,8			4,7	288	395	2,7	0,01	-0,01	-0	0,78	31,2		979,49
20FF0038	7,61	2620	14,1	459	0,18	96,5	37,4	0,6			266	504	529	109	0,09	-0,01	0,16	0,36	47,5		2063,88
20FF0094	7,5	2260	17,6	275	0,41	117	69,3	0,9			262	432	380	97,4	-0,01	-0,01	-0	1,3	76		1728,88
20FF0093	7,36	1350	15,1	159	0,16	103	26,6	0,6			58	308	351	46	0,25	0,01	0,01	1,2	58,2		1127,13
20FF0065	7,29	2130	12,5	379	0,2	58,5	40,2	0,4			215	438	434	55,6	0,02	-0,01	0,38	2,2	39,4		1675,39
20FF0071	6,68	400	9,5	21,6	0,07	43,6	8,9	0,3			4	78	157	2	-0,01	0,08	0,56	0,41	30,5		356,51
20FF0095	7,04	366	16,4	22,3	0,06	26	12,6	0,2	0,12	-0,01	7,7	34	168	1	0,01	-0,01	0,17	0,24	35,9		324,68
20FF0055	7,21	4200	43,5	581	0,33	297	100	1,9	0,02	0,07	355	1620	376	5,4	0,02	0,05	0,34	4,35	36,7		3421,68
20FF0056	7,06	1810	27,5	231	0,14	101	39,3	0,5	0,13	0,01	128	490	279	4,9	0,01	0,13	0,3	1,62	34,1		1937,64
20FF0057	6,52	540	29,7	18,7	0,04	44,1	20,3	0,3	-0,01	-0,01	19,2	102	156	5,4	0,01	-0,01	0,32	0,22	28,3		424,56
20FF0031	6,37	235	11,2	11,5	0,02	14,7	7,9	0,1	0,36	0,01	9,2	16,1	98	1,3	-0,01	-0,01	0,02	0,08	15,5		185,97
20FF0111	6,81	6670	44,6	103	0,23	592	318	2,1	0,16	0,54	1130	1380	202	30,2	0,41	0,18	0,06	6	19		3628,48
Fabrica	7,11	820	17	92,2	0,06	47,4	19,2	0,3	-0,01	-0,01	59,1	145	215	4,9	0,02	-0,01	0,1	0,57	23,9		624,72
47 - 49	7,92	379	6,1	25,8	0,05	26,2	11,1	0,2	0,04	-0,01	6,7	34	164	2,7	-0,01	-0,01	0,09	0,1	39,9		316,95
28 - 30	7,01	1780	17,5	238	0,05	78	41,3	0,6			219	470	132	17,6	0,03	-0,01	0,05	1,72			1215,84
20FF0095	6,96	365	17,7	19,4	0,06	24,1	11,5	0,2	0,02	-0,01	6,2	31	165	1,4	0,01	-0,01	0,15	-0,1	34,3		310,92
20FF0114	7,21	545	18,1	5,7	0,07	77,6	15,1	0,4	0,18	0,02	3,3	10,2	339	1	0,01	-0,01	0,05	0,7	30,1		501,52
20FF0129	7,38	23600	41,3	5440	1,27	502	436	4,7			3780	8800	560	5,9	0,33	0,26	-0	28,6	24,2		19624,55
20FF0050	7,82	475	5,2	26,4	0,08	44,8	15,5	0,2			7,3	19,5	256	2,5	0,01	-0,01	0,03	0,24	44,4		422,15
20FF0130	7,46	21700	39,9	4940	1,82	520	453	4,9			3320	7880	534	14,1	3,6	-0,01	0,29	35	31,4	0,8	17778,6
20FF0147	7,5	5870	13,5	882	0,52	522	148	3,8			196	2850	481	14,8	0,35	-0,01	0,27	12,1	36,4	0,6	5163,33
MDN-293c	7,36	3120	36,6	417	0,31	203	70,3	1,4			306	680	637	1,3	0,04	-0,01	0,2	4,8	76,1	0,3	2434,34
20FF0101	7,1	445	38,1	10,7	0,03	32,7	13,4	0,2	0,02	1,88	7,7	29,3	202	0,9	0,02	-0,01	0,38	0,05	22,4	0,3	360,07
20FF0099	7,05	865	14,5	105	0,05	46,8	19,3	0,3	0,04	0,01	54,8	135	257	8,5	0,02	-0,01	0,65	0,81	29,7	0,2	672,67
20FF0102	7,16	1490	21	226	0,1	52,5	23,4	0,5	-0,01	0,08	141	310	239	3,1	0,02	-0,01	0,63	1,7	26,3	0,3	1045,61
20FF0100	7,02	1490	20,1	205	0,11	56,5	33,5	0,6	0,01	0,36	154	315	203	1,3	0,04	-0,01	0,57	0,72	30,4	0,2	1021,4

Tabela 1 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Filadelfia Out/Nov 1992)

Nº de Poços	pH	Cond.	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD
			mg/L																		
20FF0135	7,4	2200	20,5	333	0,17	98	4,9	0,9	-0,01	-0,01	195	455	329	8,9	0,03	-0,01	0,43	2,8	0,3	0,2	1449,1
20FF0096	7,37	465	14,1	10,1	0,02	62,4	14	0,5	0,45	0,01	8,6	31,6	246	1,8	0,02	-0,01	0,46	0,08	26,8	0,6	419,33
20FF0097	7,04	475	13,7	39,1	0,04	34,4	13,1	0,5	0,47	0,01	14,3	54,4	196	3,4	0,01	-0,01	0,73	0,19	29	0,2	399,54
20FF0106	6,98	580	11,4	38,8	0,04	47,5	15,7	0,2	0,03	-0,01	19	65,8	217	6,6	0,02	-0,01	0,46	0,28	28,8	0,3	451,69
20FF0137	7,19	425	7	44,7	0,06	25,7	11,1	0,2	0,02	-0,01	13,5	44,9	182	2,6	0,02	-0,01	0,67	0,28	41,8	0,4	374,91
20FF0134	6,99	850	17,6	81,2	0,08	58,6	22,6	0,4	0,05	-0,01	34,4	114	323	2,7	0,01	-0,01	0,52	0,34	39,4	0,4	695,28
20FF0136	7,52	1440	11,8	211	0,13	57	32,3	0,6	0,05	-0,01	114	335	262	6,5	0,02	-0,01	0,44	1,4	37,8	0,6	1070,62
20FF0032	6,49	145	10,1	4,8	0,01	13,4	5,6	0,1	1,22	0,01	3,1	0,7	87	0,5	0,02	-0,01	0,32	0,03	18,8	0,1	145,8
MDN-343d	7,43	2460	17,5	32	0,08	620	15,8	2,9			6,8	1520	239	1	0,06	1,65	0,08	1,6	6,7	0,8	2465,77
MDN-343e	7,45	2150	21,9	72,2	0,12	432	34	2,1			28,2	1115	248	2,8	3,75	2,27	0,32	2,25	29,3	0,5	1694,71
MDN-343a	7,58	1010	12,8	9,1	0,06	194	16,7	1,5			6,5	380	277	0,9	0,05	1,21	0,05	0,94	25,6	0,4	926,81
MDN-343c	7,42	890	12	15,7	0,1	142	28,7	0,7			2,6	148	452	0,8	0,06	0,27	0,12	0,67	29,4	0,4	833,52
MDN-343g	7,41	2420	11	28,2	0,1	530	36,3	3,6			10	1310	241	-0,5	0,13	0,65	0,04	1,75	41,5	0,3	2214,07
MDN-343b	7,71	545	10,1	4,5	0,04	93,6	4,9	0,6			5,1	81	237	0,9	0,06	0,24	0,36	0,32	25,4	0,3	464,42
MDN-343f	7,68	535	4,3	26	0,02	96,2	7,5	0,6			2,3	212	136	1,7	0,06	0,18	0,04	0,19	16	0,1	503,19
MDN-293m	7,24	3760	30	268	0,33	636	67,4	2,1			201	1880	384	1,8	0,07	0,77	0,04	3,65	67,8	0,5	3543,26
MDN-293r	7,45	3210	16	461	0,4	221	60,5	0,9			248	1010	572	-0,5	0,01	0,41	0,07	4,25	78,7	0,6	2873,34
MDN-293o	7,39	2720	36	228	0,31	315	77,7	1,4			141	890	606	-0,5	0,02	0,83	0,04	3,55	82,1	0,5	2381,95
20FF0142	7,51	1280	22,1	15,5	0,09	236	23,8	1	-0,01	-0,01	14,2	342	489	2,4	0,06	-0,01	3,69	0,5	28,8	0,2	1179,31
Taj 415	7,61	140	7,6	4,5	0,02	14,4	4,2	0,2			<1	10,5	63	2,9	0,01	0,17	0,08	0,1	18,5		
Taj 312	8,35	291	34,8	2,1	<0,1	23,2	10,2	0			11,6	9,9	141	<5	0,02	1,43	1,43	0,3	2,7		
Taj 335	7,08	150	24,9	1,9	0,01	9,5	4,2	<1			11,2	13,1	58	1	0,11	1,24	1,24	0,4	1,5		

Aclarção:

20FF0115 = N° de poço de cadastro

MDN-343e = N° de poço de monitoramento

FAO-60 = N° de poço de estudo

TAJ 415 = N° de reservatório de infiltração

Total de sólidos dissolvidos (TSD em mg/L) é calculado

Cond. : Condutividade elétrica em µS/cm

K=Potássio; Na=Sódio; Li=Lítio; Ca=Cálcio; Mg=Magnésio; Sr=Estrôncio; Fe=Ferro; Mn= Manganês; Cl=Cloro; SO4=Sulfato;

HCO3=Bicarbonato; NO3=Nitrato; NO2=Nitrito; NH4=Amônia; PO4=Fosfato; B=Boro; SiO2= Silica; F=Fluor (em mg/L)

Tabela 2 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Loma Plata)

Nro. de Poços	pH	C.E. $\mu\text{S/cm}$	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Sr	Li	NH4	B	Cl	SO4	CO3	HCO3	NO3	NO2	PO4	TSD	Data
mg/L																						
29MLP001	7,49	354		23,6	8,8	23,60	10,80	0,010	0,12	0,30	0,06	<0,1	0,1	18,1	27,2	<1	146,40	<5	0,03	0,09	258,01	17/11/93
29MLP003	7,12	752	27,2	87,6	12,8	27,00	17,8	1,100	0,19	0,40	0,07	3,85	0,5	76,2	112,0	<1	188,10	<5	0,06	1,83	527,50	17/11/93
29MLP007	8,17	1258	27,8	189,5	10,90	30,00	23,6	1,910	0,84	0,80	0,09	0,57	0,9	131,4	91,7	<1	393,60	1,10	0,03	0,84	877,78	17/11/93
29MLP013	7,63	660	24,6	49,0	49,0	15,45	20,2	<0,1	0,32	0,30	<0,1	<0,1	0,4	42,0	59,9	<1	265,40	29,40	0,18	0,29	524,79	26/10/93
29MLP014	8,25	8900	28,4	700	56,2	488	244,4	0,110	0,75	3,06	0,04	0,08	5	1780,0	788,0	<1	402,70	45,50	0,68	0,98	4495,44	16/02/94
29MLP015	8,79	160	24,2	10,2	7,1	10,6	5	0,010	0,01	0,30	0,04	<0,1	0,1	6,4	4	<1	83,00	<5	0,01	0,82	127,38	17/11/93
29MLP017	7,32	2780	26,7	646,0	6,5	15,00	7,5	0,250	<0,1	0,10	0,08	<0,1	2,4	836,8	311,0	<1	396,00	78,00	0,03	0,56	2003,12	16/02/94
29MLP018	8,34	2050	26,0	478	5,3	2	6,5	0,020	0,01	0,20	0,11	<0,1	2	450,9	69,2	14,00	395,00	11,20	0,03	1,65	1436,12	17/11/93
29MLP020	7,11	7410	25,4	816	77	478	219,8	0,730	0,97	4,10	0,02	<0,1	6,2	1300,0	1425,0	<1	521,70	75,70	0,84	0,31	4926,57	17/11/93
29MLP021	8,46	1730	27,6	86,0	11,7	190,00	46,6	0,160	0,05	1,40	<0,1	0,06	0,4	119,8	165,8	<1	234,90	347,10	0,19	0,85	1238,03	16/02/94
29MLP024	7,19	1586	26,3	68	12,8	155	50	0,200	0,07	2,10	0,07	0,05	0,4	149,2	112,8	<1	238,00	312,60	0,05	0,72	1102,26	17/11/93
29MLP027	7,19	1759	26,9	257,5	12,8	46,00	35,0	0,100	0,78	0,90	0,11	<0,1	1,2	233,5	413,8	<1	128,10	10,20	0,16	0,71	1142,85	17/11/93
29MLP028	6,84	597	30,0	19,2	10,0	68,20	15,9	0,110	0,01	0,80	0,01	<0,1	0,1	22,6	50,0	<1	191,00	46,60	0,05	0,52	424,90	16/02/94
29MLP029	7,76	622	25,3	18,4	11,0	56,80	26,9	0,010	0,04	0,80	0,12	<0,1	0,1	19,4	8,9	<1	253,20	75,10	0,15	0,16	473,70	17/11/93
29MLP030	7,35	3740	30,9	425,0	15,10	77,0	67,000	<0,1	<0,1	1,20	0,07	1,1	3,2	369,0	440,50	-0,10	549,20	2,80	0,29	0,09	2033,92	17/03/94
29MLP032	6,88	468		20,6	11,4	51,20	19,2	0,090	0,01	0,40	0,01	<0,1	0,2	30,1	7,5	<1	241,00	10,40	0,06	0,48	392,66	23/11/93
29MLP033	6,58	338		22,5	10,9	31,10	10,6	0,370	0,56	0,20	0,01	<0,1	0,1	20,7	27,3	<1	148,00	4,30	0,02	0,47	277,13	23/11/93
29MLP034	6,78	2830	25,0	288,0	19,6	199,00	72,2	1,030	1,23	1,00	0,01	0,52	0,9	480,0	511,0	<0,1	177,00	62,10	0,11	0,11	1813,85	06/12/93
29MLP036	6,81	685	26,3	31,6	20,2	19,20	24,3	0,230	1,35	0,80	0,01	<0,1	0,3	47,6	48,6	<1	133,00	9,30	0,16	0,36	685,00	10/02/94
29MLP038	7,30	371	25,3	41,2	7,9	17,00	8,3	1,490	0,35	0,10	<0,1	0,14	0,2	21,0	22,2	<1	158,70	5,00	0,08	0,86	284,61	01/11/93
29MLP040	6,52	297	26,7	30,1	5,7	16,30	9,0	0,120	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	0,1	28,2	26,7	<1	92,70	23,40	0,01	0,61	236,04	26/10/93
29MLP041	7,62	707	27,3	30,2	50	32,2	38,000	<0,1	<0,1	7,00	0,07	0,17	0,3	33,9	77,30	<1	247,60	57,90	0,07	0,20	665,01	01/03/94
29MLP042	7,25	1588	27,3	74,5	27,1	77,50	94,8	0,610	0,14	2,20	0,13	0,36	0,6	102,7	166,0	<1	329,50	251,80	0,60	0,52	1129,08	16/02/94
29MLP043	7,78	3870	24,7	610	23,2	81	76,2	0,010	0,01	1,00	0,40	0,06	3,1	646,0	539,8	<1	576,6	137,30	0,01	0,28	2575,97	17/11/93
29MLP046	7,59	1865	25,5	198	21,8	89	67	<0,1	<0,1	5,00	<0,1	0,10	0,8	271,6	106,4	<1	408,80	24,40	0,02	0,08	1158,51	01/11/93
29MLP047	6,65	720	24,9	106	6,8	28	16,8	0,210	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	0,60	139,3	56,6	<1	125,10	2,70	<0,1	0,16	482,17	01/11/93
29MLP048	7,36	10570	26,2	2250,0	14,0	95,00	138,5	0,290	0,05	1,10	0,49	<0,1	14,0	1972,8	2359,6	<1	326,00	34,80	0,79	0,43	7207,75	26/10/93
29MLP049	7,60	5800	24,7	1100,0	12,4	44,00	36,6	0,090	<0,1	0,30	0,30	<0,1	6,4	1055,0	768,4	<1	625,50	<5	0,16	0,56	3649,71	26/10/93
29MLP050	6,10	280	29,9	11,3	10,5	9,90	0,2	0,070	0,10	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	23,0	31,0	<1	86,50	6,20	0,01	0,10	205,70	26/10/93
29MLP051	6,09	3060	24,7	357,0	12,7	96,00	104,3	0,150	0,54	1,30	0,04	<0,1	1,9	566,2	631,8	<1	100,70	6,00	0,03	0,29	1868,95	26/10/93
29MLP053	7,64	9570	25,6	2272,0	13,3	22,00	50,8	0,010	0,32	0,10	0,56	0,02	19,6	1744,6	1995,0	<1	557,00	36,80	0,31	0,84	6713,26	26/10/93
29MLP054	6,60	7160	28,5	1210	24,8	100	142	0,100	0,63	2,00	0,24	0,01	6,3	1149,2	1649,0	<1	292,90	2,90	0,02	0,03	4550,13	26/10/93
29MLP055	7,20	774	31,6	100,4	11,0	20,00	17,4	1,040	0,51	0,20	<0,1	<0,1	0,5	88,0	92,6	<1	189,20	<5	<0,1	0,01	520,56	26/10/93
29MLP056	6,97	5720	24,5	706,0	24,8	350,00	114,4	0,300	0,33	2,90	0,01	<0,1	3,4	806,7	1248,0	<1	402,70	<5	0,01	0,31	3682,68	26/10/93
29MLP057	6,54	3990	25,2	461,0	19,7	179,00	92,5	0,150	2,11	2,00	<0,1	0,06	2,4	845,4	666,6	<1	335,60	2,90	0,03	0,29	2598,47	26/10/93
29MLP058	6,71	517	25,4	34,0	10,2	40,50	18,5	0,350	1,97	0,30	<0,1	0,41	0,4	30,2	46,1	<1	226,30	<5	0,01	0,17	411,41	26/10/93
29MLP059	6,33	1934	26,3	232,1	16,1	66,90	42,9	1,910	0,08	0,90	<0,1	<0,1	1,7	2883,3	397,0	<1	177,60	9,50	0,01	0,24	1249,34	26/10/93
29MLP060	7,03	1564	25,0	73,3	73,1	106,20	60,3	3,380	1,70	0,03	2,96	0,7	74,0	247,0	<1	485,00	2,50	0,28	0,27	1130,72	26/10/93	
29MLP061	7,38	6090	23,9	1026	26	130	96,2	0,090	0,27	1,60	0,23	<0,1	4,9	1003,5	1092,0	<1	582,70	0,50	0,04	0,46	3963,99	26/10/93
29MLP062	7,33	4800,00	26,90	750,3	4,0	132,0	106,6	0,07	0,10	1,4	0,22	<0,1	5,6	749,1	1070,6	<1	489,9	42,4	0,02	0,50	3372,91	26/10/93

Tabela 2 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Loma Plata)

Nro. de Poços	pH	C.E. $\mu\text{S/cm}$	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Sr	Li	NH ₄	B	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃	NO ₂	PO ₄	TSD	Data	
mg/L																							
29MLP063	7,41	935,00	26,10	115,6	46,1	37,4	24,1	1,55	0,03	0,2	<0,1	0,61	0,6	133,7	77,1	<1	236,0	45,4	0,03	0,43	716,25	01/11/93	
29MLP064	6,7	462,00	24,90	48,6	9,0	25,0	11,2	0,23	0,17	0,10	<0,1	0,26	0,3	35,0	30,4	<1	163,1	0,90	0,11	0,70	345,07	01/11/93	
29MLP065	6,9	1553,00	25,80	238,0	10,0	38,5	26,2	0,81	<0,1	0,30	<0,1	0,03	0,3	1,1	371,1	137,3	<1	128,1	<5	0,10	0,33	951,78	01/11/93
29MLP066	7,34	3000,00	26,50	364,0	16,9	88,0	95,9	0,08	<0,1	1,60	0,09	0,16	1,8	484,8	195,8	<1	509,5	133,6	0,02	0,10	1909,95	01/11/93	
29MLP067	7,09	614,00	25,90	56,4	13,2	36,2	15,1	0,36	0,22	0,10	<0,1	0,02	0,3	101,0	32,1	<1	125,1	1,9	0,01	0,81	382,65	01/11/93	
29MLP068	6,11	300	-	13,4	10,6	22,6	11,7	0,32	0,15	0,3	<0,1	<0,1	0,2	63,9	4,9	<1	73,2	1	0,01	0,81	182,32	01/11/93	
29MLP069	6,72	2970	26,10	377,0	34,9	104,0	106,1	0,01	<0,1	1,70	0,07	0,12	1,9	519,1	302,0	<1	467,3	41,3	0,02	0,12	1986,64	01/11/93	
29MLP070	6,82	10740	25,50	1679,0	45,5	380,8	191,3	0,02	0,23	3,90	0,12	0,01	7,6	21081,0	1927,0	<1	488,2	2,5	0,01	0,18	6834,45	01/11/93	
29MLP072	6,55	1668	24,30	229,0	17,3	70,3	33,0	0,26	0,25	0,50	<0,1	0,05	0,6	316,8	216,6	<1	155,6	3,3	0,04	1,68	1047,16	01/11/93	
29MLP073	6,99	324	25,70	42,6	9,4	15,4	6,9	0,19	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	0,3	31,2	21,1	<1	137,0	2,8	0,01	0,59	267,89	01/11/93	
29MLP074	7,60	3170	-	557,0	11,5	111,0	83,4	0,11	0,01	0,7	0,19	0,1	4,7	501,6	500,2	<1	538	28,7	0,01	0,01	2305,29	23/11/93	
29MLP075	7,22	1170	-	208,0	10,0	43,0	13,2	0,07	0,01	0,3	0,03	0,02	1	148,1	102,8	<1	328,5	47,1	0,05	<0,1	903,16	23/11/93	
29MLP076	7,79	643	-	76,2	17,1	36,0	12,6	0,4	0,18	0,3	0,01	<0,1	0,6	40,0	52,2	<1	259,3	6,3	0,07	0,05	503,31	23/11/93	
29MLP078	6,54	5650	-	1094,0	12,2	162,0	34,1	0,14	0,1	6,9	0,15	0,1	6,2	1089,0	931,2	<1	383	68,2	0,18	0,22	3724,07	23/11/93	
29MLP079	7,43	1760	-	286,5	11,7	75,0	10,1	0,1	0,39	2,5	0,01	0,03	1,4	210,0	249,8	<1	405	1,8	0,01	0,28	1254,41	23/11/93	
29LMP080	6,95	448	25,00	39,9	7,2	43,5	10,7	0,08	0,20	2,3	0,20	<0,1	0,2	44,3	31,2	<1	177	4,3	0,01	0,17	361,46	23/11/93	
	6,63	467	26,70	41,8	5,2	31,2	6,8	0,19	0,02	0,2	<0,1	0,01	0,3	48,0	36,0	<1	135,4	4,2	0,04	0,51	312,06	16/02/94	
25MLP081	5,91	65	-	6,5	4,5	5,7	1,7	0,98	0,01	0,1	<0,1	0,01	0,2	4,1	2,9	<1	40,5	<5	0,05	0,19	67,44	01/11/93	
25MLP082	7,62	3120	25,70	529,0	24,7	51,0	43,8	0,07	0,06	0,3	0,22	0,04	1,8	544,2	286,8	<1	398,1	59,6	0,38	0,48	2030,35	01/11/93	
	7,3	2830	26,60	472,0	10,0	42,0	31,0	0,07	0,11	0,7	0,17	0,01	3,2	416,1	372,0	<1	255	48,5	0,22	0,96	1659,94	16/02/94	
25MLP083	7,68	6500	-	1352,9	9,4	32,0	36,2	0,07	<0,1	0,2	0,29	0,11	9,2	1197,2	1036,3	<1	453	126,9	0,02	0,57	4255,46	01/11/93	
25MLP085	7,70	1565	27,00	330,2	3,2	15,5	8,5	0,10	<0,1	0,10	0,05	<0,1	2,9	286,4	165,5	<1	235,0	26,7	0,04	0,33	1079,82	01/11/93	
25MLP087	7,81	4620	27,00	912,0	9,6	39,0	42,4	<0,1	<0,1	0,20	0,28	0,09	6,3	971,3	526,4	<1	340,0	134,0	0,01	0,57	2982,65	01/11/93	
25MLP088	7,76	2210	-	350,5	5,4	24,0	62,8	0,08	0,01	5,1	3,4	0,01	2,1	356,0	166,6	<1	549,2	15,4	0,29	6,26	1539,08	23/11/93	
29MLP089	7,38	1283	-	144,0	1,2	114,5	36,2	0,25	1,04	0,07	0,06	0,04	0,6	137,4	73,0	<1	549,2	<5	0,01	<0,1	1097,20	23/11/93	
29MLP090	7,39	5430	-	764,2	2,2	300,0	148,0	0,06	0,2	2,7	0,4	0,02	4,8	828,4	1238,0	<1	485,1	<5	0,03	<1	3781,91	01/11/93	
29MLP091	6,70	8370	24,90	793,0	53,6	506,0	215,2	0,03	1,33	2,70	<0,1	0,13	5,1	1759,0	932,0	<1	500,4	<5	0,02	0,31	4763,02	01/11/93	
29MLP092	7,11	2280	24,10	210,0	56,3	37,9	93,2	1,60	3,54	2,2	0,01	0,5	0,5	344,1	212,0	<1	430,2	1,7	0,05	0,23	1394,03	17/11/93	
29MLP096	7	1620	29,00	242,5	14,1	75,0	31,1	0,17	0,17	1	0,12	0,2	0,4	264,8	224,9	<1	226	3,1	0,07	0,5	1103,75	16/02/94	
29MLP098	7,27	967	24,10	143,0	9,2	22,0	12,1	0,01	0,24	0,30	0,05	<0,1	0,5	120,1	70,6	<1	234,9	<5	0,02	1,56	614,78	17/11/93	
29MLP101	7,30	5100	24,30	612,0	71,8	196,0	135,6	0,10	0,42	3,10	0,03	<0,1	2,6	917,4	537,2	<1	448,4	167,9	1,58	0,51	3096,55	17/11/93	
29MLP104	7,25	4320	26,1	688,0	11,4	163,0	121,8	<0,1	0,07	1,4	0,2	0,28	4	1130,8	261,2	<1	561,4	67,2	0,03	0,3	3075,68	01/03/94	
29MLP106	6,68	462	25,00	23,0	7,8	25,1	28,9	0,17	0,1	0,60	0,03	<0,1	0,1	47,1	33,7	<1	137,3	30,6	0,10	0,31	334,95	17/11/93	
29MLP107	7,8	1142	24,60	56,0	35,4	49,0	64,2	0,01	0,0	0,86	0,18	0,07	0,4	110,2	63,7	<1	375,3	49,7	0,07	0,40	805,08	17/11/93	
29MLP108	7,52	279	28,30	22,9	13,5	15,0	8,9	0,10	0,2	0,40	0,08	<0,1	0,5	17,8	15,9	<1	120,0	<5	0,05	0,07	215,39	17/11/93	
29MLP110	6,56	200	30,70	8,5	4,7	18,4	8,1	0,33	0,06	0,1	<0,1	<0,1	0,1	8,4	10,6	<1	103,7	0,5	0,01	0,32	163,84	16/02/94	
29MLP113	6,8	113	27,70	8,1	7,8	7,3	2,9	0,82	<0,1	<1	0,01	0,16	0,2	8,2	4,1	<1	5,0	0,8	0,02	0,83	105,54	01/03/94	
29MLP121	6,39	95	26,50	4,7	7,1	7,4	3,1	<0,1	<0,1	<1	0,01	<0,1	0,1	4,8	4,1	<1	44,5	2,1	0,01	0,8	98,81	01/03/94	
29MLP122	6,58	4010	27,20	538,0	25,3	222,0	81,0	<0,1	1,2	0,9	0,03	0,35	1,7	942,0	323,8	<1	382	11,1	0,03	0,87	2877,05	01/03/94	
29MLP124	6,02	125	23,20	6,6	6,3	9,8	4,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,08	0,7	6,7	5,0	<1	58	0,6	0,03	0,77	101,78	15/03/94	

Tabela 2 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Loma Plata)

Nro. de Poços	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Sr	Li	NH4	B	Cl	SO4	CO3	HCO3	NO3	NO2	PO4	TSD	Data		
												mg/L												
29MLP125	7,46	5020	24,3	936,0	15,2	162,00	61,0	0,1	0,04	0,40	0,05	0,24	5,2	908,9	571,4	-0,10	796,10	2,80	0,04	0,27	3623,19	20/06/95		
29MLP126	7,47	339	23,8	44,3	7,7	17,50	3,5	0,04	0,03	0,10	-0,01	0,10	0,2	6,4	6,2	-0,10	185,90	-0,50	0,03	0,42	295,22	20/06/95		
29MLP127	7,65	144	17,7	7,6	6,3	11,8	3,8	0,04	0,04	-0,1	-0,01	0,06	0,10	6,7	3,9	-0,1	68,70	1,80	0,06	0,65	131,57	20/06/95		
29MLP128	7,17	267	28,8	20,5	8,9	17,8	7,8	0,04	0,05	0,20	0,02	0,21	0,2	10,6	1,0	-0,10	149,30	-0,50	0,07	0,04	240,33	20/06/95		
29MLP129	6,68	236	24,1	38,7	3,5	4,7	1,7	0,05	0,06	0,10	0,01	0,02	0,2	21,0	30,7	-0,10	54,80	4,80	0,03	0,12	179,69	20/06/95		
29MLP130	7,76	3580	21,0	992,0	2,7	38	14,1	0,02	0,03	0,40	0,04	0,14	3,10	935,0	280,6	-0,1	998,10	2,00	0,07	1,06	3304,68	20/06/95		
29MLP131	7,91	167	21,0	14,0	11,0	9,7	3,3	0,07	0,06	0,10	0,02	2,17	0,1	3,5	5,7	-0,10	65,50	30,90	0,10	3,24	157,46	20/06/95		
29MLP132	7,55	5270	24,5	1152,0	0,8	80	48,6	0,03	0,05	0,40	0,04	0,12	5,1	1019,9	880,0	-0,10	524,30	3,80	0,05	0,24	3752,03	20/06/95		
29MLP133	7,55	7970	26,0	1186,0	74,2	446	319,4	0,02	0,04	0,6	0,04	0,26	8,0	1912,2	1638,5	-0,10	466,80	73,2	0,13	0,23	6188,42	20/06/95		
29MLP134	7,49	5200	27,0	908,0	5,0	134	51,8	0,010	0,02	0,4	0,02	0,04	4,2	708,0	814,8	-0,10	896,10	62,8	0,56	0,27	3629,31	20/06/95		
29MLP135	7,58	2220	24,3	382	9,9	73,5	17,3	0,02	0,03	0,3	0,03	0,13	2,3	312,7	300,5	-0,10	446,00	10,4	0,45	0,33	1588,69	20/06/95		
29MLP136	7,27	895	21,3	118,4	21,3	59	24,3	0,04	0,06	0,2	0,04	0,03	0,8	185,0	175,3	-0,10	76,80	9,40	0,22	0,64	686,43	20/06/95		
29MLP137	7,31	2120	24,6	252,5	30	181	76	-0,01	0,02	0,8	0,02	0,03	2,2	492,4	262,6	-0,1	428,70	1,6	0,18	0,34	1764,39	20/06/95		
29MLP138	7,2	507	21,2	75,6	5	19,6	9	0,06	0,04	0,3	0,02	-0,01	0,50	13	58,1	-0,1	146,1	67,90	0,06	1,85	439,32	20/06/95		
29MLP139	7,68	574	24,3	77	7,3	26,8	9,6	0,06	0,07	0,3	0,03	-0,01	0,5	38,3	107	-0,1	141,10	4,4	0,09	2,05	427,80	20/06/95		
29MLP140	7,51	151	21,6	6,7	4,8	13,6	4,8	0,02	0,02	0,2	0,01	-0,01	0,1	11	3,8	-0,1	65,60	2,3	0,07	0,45	134,17	20/06/95		
29MLP141	7,54	5720	24,2	1966	12,6	146	80,6	0,03	0,04	0,4	0,04	0,08	5,4	1988	1051,2	-0,1	801,40	8,4	0,10	0,38	5520,37	20/06/95		
29MLP142	6,67	95	26	2	6,5	8,7	3,2	-0,01	-0,01	-0,1	-0,01	-0,01	0,1	8,3	0,9	-0,1	38,50	3,4	0,03	0,63	94,26	20/06/95		
29MLP143	7,36	8590	21,6	1172	51,6	448	140	0,02	0,04	0,8	0,04	3,8	6,2	1659,4	1225,3	-0,1	611,30	6,6	1,73	13,70	5353,13	20/06/95		
29MLP144	7,17	307	25,9	25,3	9,1	15,3	4,8	0,01	0,02	0,1	0,02	1,37	0,2	29	28	-0,1	61,50	4,8	0,51	0,12	200,75	20/06/95		
29MLP145	6,57	248	24	14,7	8,4	21	5,7	-0,01	-0,01	-0,1	-0,01	-0,01	0,2	35	16,9	-0,1	63,10	-0,5	0,08	0,4	200,49	20/06/95		
29MLP146	7,11	434	26	56,7	6,2	18,7	5,5	0,04	0,03	0,1	0,02	-0,01	0,3	32,3	37,4	-0,1	161,70	2,3	0,03	0,54	342,46	20/06/95		
29MLP147	7,01	625	25,6	103,4	8,7	38,2	7,9	0,02	0,02	0,2	0,02	-0,01	0,5	108,1	45,8	-0,1	189,80	1,7	0,03	0,28	506,47	20/06/95		
DRH-A-447	7,58	30600		7800	34	880	444					5,4	1,08	0,16	47,5	6366	9916	<1	778	2,50	1,02	<0,01	26275,00	18/11/93
DRH-A-448	7,61	36600		8816	170	720	795,2					7,8	1,08	0,42	52	7852	11113	<1	656	<5	0,11	<0,01	30283,61	18/11/93
DRH-A-449	8,19	6200		1284	15	80	31,6					0,3	0,43	0,64	7,6	1060	874	<1	744,00	109	3,84	<0,01	4210	19/11/93
DRH-A-453	8,14	8900		1444	450	192	7,5	0,2	0			0,7	0,06	0,72	8,6	1801	1459	<1	385,00	35,1	0,52	<0,01	5794,26	23/11/93
DRH-A-454	7,41	11880		2305	22	300	1052,8					0,5	0,99	0,34	8	4624	2808	<1	720,00	80,6	1,16	0,63	11724,36	25/11/93
DRH-A-460	8,12	5730		1030	12	92	198,6					1,1	0,37	0,21	1	1339	1040	<1	372,40	21,5	0,14	<0,01	4110,41	18/11/93
DRH-A-466	7,67	1450		239	6,6	46	17,9					0,2	<0,01	0,61	1,3	209,1	244	<1	213,60	0,5	0,05	0,02	662,67	18/11/93
DRH-R-475	7,56	36300		9590	90	500	644	0,09	-0,01	4,1	1,08	4,44	32,7	9336,2	10189	-0,1	253,00	0,4	0,10	0,25	30682,06	10/03/94		
DRH-R-476	7,83	1468		255	9,3	31,5	21,6	0,56	-0,01	0,4	-0,01	1,09	2,1	211,8	242,4	-0,1	207,5	-0,50	0,11	0,73	1022,29	11/03/94		
DRH-R-477	7,9	30200		7140	120	620	716	0,14	0,62	4	0,84	3,95	30,3	8394,5	6666	-0,1	512,80	0,3	0,27	0,14	24146,8	15/03/94		
DRH-R-478	7,56	32400		7920	86	460	630	0,52	1	3,9	1	3,21	32,1	6297	11659	-0,1	625,50	0,3	0,16	0,27	27756,98	16/03/94		
DRH-R-479	7,8	6670		1222	14,4	254	146,2	0,5	0,1	2,6	0,29	3,19	4,3	1606	1234,8	-0,1	227,00	0,3	0,13	0,12	4723,83	18/03/94		
DRH-R-480	8,2	2450		443	10,9	64	22	0,86	0	0,5	0,1	0,26	2,5	401	475,5	-0,1	262,4	5,30	0,3	0,04	1701,46	12/04/94		
DRH-R-481	7,81	1237		176,5	13,1	47	18,2	0,01	0,01	0,3	0,06	0,16	0,7	206	210,8	-0,1	122,00	1	0,01	0,39	819,62	12/04/94		
DRH-R-482	7,31	5540		767	29,2	243	125					2	0,08	0,36	4,2	1074,1	916,8	-0,1	341,70	1,1	0,04	0,03	3522,61	13/04/94
DRH-R-483	7,31	2210		171	16,2	194,4	57					1,4	0,09	0,16	1,5	460,6	364,4	-0,1	86,50	2,4	0,04	0,22	1364,71	15/04/94
DRH-R-484	7,7	12310		2550	25	505	291					4,1	0,47	0,2	14,6	2990	3127	-0,1	512,60	2,5	0,05	0,22	9858,54	15/04/94

Tabela 2 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Loma Plata)

Nro. de Poços	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Sr	Li	NH ₄	B	Cl	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	NO ₃	NO ₂	PO ₄	TSD	Data
												mg/L										
Taj 1	7,9	128	23,6	3,3	9,7	12	4	0,07	0,06	0,2	0,02	0,14	0,1	12	6,7	0	47,00	2,2	1,20	0,1	107,86	22/06/95
Taj 2	7,7	174	20,6	6,7	12	16	4,6	0	0,02	0,1	0	0,03	0,1	15	2,1	0	75,00	-0,5	0,07	1	160,07	23/06/95
Taj 3	8	86	19,4	2	10	8,8	2,7	0,02	0,02	0,2	0,11	0,11	0,1	8,9	9,6	0	32,00	-0,5	0,22	0,4	80,59	23/06/95
Taj 4	7,9	98	20	2,9	11	9,6	3,8	0,03	0,04	0	0	0,15	0,1	14	13	0	28,00	2,2	0,24	1,7	94,46	23/06/95
Taj 5	8	167	20,2	12	11	17	3,9	0,02	0,03	0,1	0	0,07	0,06	23	10	0	63,00	1,8	0,15	1,1	153,98	23/06/95
Taj 118	8	1339	21,2	230	27	62	20	0,08	0,09	0,2	0,01	0,21	1,1	212	200	0	285,00	0,5	0,05	0,2	1033,70	23/06/95
Taj 7	7,8	148	22,3	6,4	13	14	4	0,09	0,11	0,1	0,02	0,21	0,08	16	10	0	53,00	3,1	0,21	2	147,41	23/06/95
Taj 119	9,2	1077	23	271	15	40	13	0,09	0,16	0	0	0,21	0,9	237	128	38	321,00	-0,5	0,09	0,4	1059,60	23/06/95
Taj 9	8,2	108	22	3,8	7,7	14	2,6	0,02	0,03	0	0	0,03	0,1	9,9	5,8	0	49,00	2,3	0,10	0,7	100,11	23/06/95

Aclaración:

29MLP0151 = Numeración de poço de propietarios
 DRH-A-453 = poço de estudo (método AUGER)
 DRH-R-484 = poço de monitoramento (método ROTATIVO)
 Taj 9 = Reservatórios de Infiltração (tajamares)

C.E. : Conductividade elétrica em $\mu\text{S}/\text{cm}$ Total de sólidos dissolvidos (TSD-mg/L) é calculado.
 K=Potássio; Na=Sódio; Li=Lítio; Ca=Calcio; Mg=Magnésio; Sr=Estrôncio; Fe=Ferro; Mn= Manganês; Cl=Cloro; SO₄=Sulfato;
 HCO₃=Bicarbonato; NO₃=Nitrato; NO₂=Nítrito; NH₄=Amônia; PO₄=Fosfato; B=Boro; SiO₂= Sílica; F=Fluor (em mg/L)

Tabela 3 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Neu Halbstadt)

Nro. de Poços	Temp. °C	pH	C.E. µS/cm	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD	Data	
20NEU0002	7,76	3420	4,7	501,0	0,02	53,0	56,0	0,30	0,20	0,30		mg/L	759,5	118,5	350,5	47,0	0,10	0,15	0,06	3,60	82,0	0,4	1796,2	31/7/96
20NEU0004	27,2	7,64	1310	7,7	136,0	0,10	62,0	44,2	0,80	0,10	0,20	245,3	13,1	342,0	44,0	<0,01	0,07	0,04	1,40	77,7	0,1	802,9	24/7/96	
20NEU0006	27,8	7,54	2000	4,7	273,5	0,02	50,5	41,5	0,30	0,10	0,20	342,4	28,8	421,0	96,0	0,01	0,07	0,50	2,10	102,0	0,2	1160,0	24/7/96	
20NEU0007	24,6	7,63	1430	2,1	212,5	0,01	54,0	30,8	0,50	0,10	0,20	275,0	30,9	342,0	38,0	0,03	0,04	0,02	1,50	17,2	0,3	831,5	24/7/96	
20NEU0009	26,8	7,62	891	6,2	128,6	0,01	16	18,2	0,20	0,30	0,20	20,0	6,3	312,7	141,0	0,01	<0,01	0,80	1,00	92,0	0,2	582,9	1/10/96	
20NEU0011	26,5	7,52	2330	17,6	346	0,02	56	45,1	0,50	0,20	0,20	488,9	35,8	392,1	104	0,02	0,08	0,10	2,50	75,7	3,6	1366,1	1/10/96	
20NEU0012	26,2	7,57	904	5,6	127,6	<0,01	19,2	24,9	0,20	0,10	0,20	60,0	7,7	418,0	18,4	0,03	0,16	0,84	1,10	81,2	0,2	533,2	31/7/96	
20NEU0014	29,0	7,47	3170	11,4	499	0,03	57	54,3	0,50	0,30	0,30	808,2	79,4	370,0	6,3	1,69	0,57	0,08	3,00	107,0	0,1	1692,8	29/10/96	
20NEU0015	27,3	7,38	1580	32,1	131	0,02	22,3	70,2	0,40	0,30	0,30	309,0	9,1	292,9	50,1	0,01	0,10	0,10	1,80	63,0	0,2	813,2	1/10/96	
20NEU0021		7,59	2170	6,4	389,0	<0,01	32,5	18,6	0,20	0,30	0,20	431,0	60,0	428,0	15,5	0,01	<0,01	0,26	2,30	60,4	0,1	1227,5	28/8/96	
20NEU0022		7,42	1330	8,6	98,4	0,02	105,6	31,6	0,30	0,20	0,20	154,4	91,2	270,0	93,7	0,54	2,66	0,10	1,46	82,4	0,2	804,4	28/8/96	
20NEU0023	26,0	7,72	1920	16,8	335	0,02	24,5	19,3	0,40	0,10	0,30	397,2	29	388,0	67,9	0,01	<0,01	0,10	2,00	76,0	0,4	1119,9	1/10/96	
20NEU0024	25,4	7,70	811	9,9	84,9	0,01	35,7	26	0,60	0,30	0,40	54,0	6,4	340,9	43,5	2,03	0,06	<0,01	0,40	0,9		439,9	1/10/96	
20NEU0025	27,5	7,87	1320	16,8	236,2	0,03	22,2	18	0,40	0,30	0,20	231,0	13,7	348,0	66,7	0,02	<0,01	0,14	1,50	73,0	0,1	860,5	1/10/96	
20NEU0026		7,59	1220	6,7	150,4	0,01	42,0	30,5	0,10	0,10	0,40	223,0	80,0	218,0	26,8	<0,01	0,01	0,03	1,30	84,8	0,1	733,5	26/8/96	
20NEU0027	25,0	7,44	2310	15,2	227,5	<0,01	51,5	103,4	0,40	0,20	0,30	495,5	134,3	370,7	16,6	0,01	0,16	0,07	2,40	94,4	0,1	1354,5	18/8/96	
20NEU0028	28,0	7,30	2940	13,3	422,0	0,02	126,0	48,1	0,30	0,10	0,30	655,8	196,6	404,3	13,7	0,01	0,01	0,10	3,10	88,0	0,2	1765,6	18/8/96	
20NEU0029		7,64	1720	13,0	230,0	0,01	45,0	48,2	0,10	0,20	0,30	350,0	32,5	358,0	26,8	0,02	<0,01	0,07	1,80	108,0	0,1	1029,3	28/8/96	
20NEU0030	26,0	7,72	1001	7,5	115,8	0,01	30,2	26,0	0,30	0,30	0,20	181,0	17,2	201,0	26,4	0,03	0,10	0,10	1,00	86,0	0,4	572,6	18/8/96	
20NEU0031	26,1	7,79	649	7,1	58,1	0,01	27,9	22,9	0,40	0,30	0,20	36,1	1,9	301,0	13,6	0,02	<0,01	0,02	0,70	82,4	0,3	400,1	31/7/96	
20NEU0032	26,9	7,72	572	5,4	63,4	<0,01	25,0	16,2	0,30	0,30	0,30	18,1	2,4	256,6	19,1	<0,01	<0,01	0,02	0,80	61,6	0,3	330,3	31/7/96	
20NEU0033	27,0	7,89	1020	4,6	140,2	0,01	19,4	11,4	0,50	0,10	0,10	155,0	8,5	219,0	23,4	0,08	0,01	0,06	1,00	84,6	0,2	536,9	18/8/96	
20NEU0034	25,0	7,51	1016	9,8	83,8	0,01	55,2	33,7	0,60	0,10	0,10	160,7	15,6	240,0	27,8	0,08	0,01	0,10	1,60	74,4	0,3	581,9	18/8/96	
20NEU0036	24,6	7,80	2480	16,2	408	<0,01	41	26,1	0,50	0,10	0,20	490,0	78,8	447,0	47,7	<0,01	<0,01	0,14	2,60	55,0	0,1	1386,4	1/10/96	
20NEU0038	26,8	7,53	962	4,4	100,0	0,01	58,8	20,3	0,50	0,20	0,30	103,0	11,0	320,0	51,0	0,01	0,17	0,08	1,10	74,0	0,2	582,5	31/7/96	
20NEU0039		7,48	4050	11,8	659,0	0,03	58,0	60,2	0,30	0,10	0,10	954,3	157,2	501,7	15,1	0,01	0,13	0,10	4,00	81,2	0,2	2248,6	28/8/96	
20NEU0040		7,50	5080	11,4	900,0	0,02	76,0	69,9	0,20	0,20	0,20	1200,0	241,8	466,9	15,6	0,01	0,09	0,11	5,10	76,0	0,3	2969,7	28/8/96	
20NEU0042		7,27	2996	10,1	249,0	0,01	270,5	101,0	0,20	0,20	0,20	893,7	72,8	311,2	21,8	0,04	0,22	0,04	3,00	68,2	0,1	1844,2	28/8/96	
20NEU0043	26,1	7,51	1577	7,2	221,5	0,02	68,0	24,9	0,60	0,30	0,20	305,6	40,6	302,1	71,6	0,07	0,01	0,11	1,60	67,4	0,4	968,8	18/8/96	
20NEU0045		7,88	1230	4,4	175,8	<0,01	37,8	14,4	0,30	0,10	0,20	178,8	42,0	224,0	165,7	0,01	<0,01	0,19	1,30	65,0	0,1	736,1	28/8/96	
20NEU0046	28,0	7,62	1636	5,2	284,5	0,03	55,5	37,0	0,50	0,30	0,20	340,0	32,3	326,0	170,0	0,01	0,02	0,06	1,90	77,4	0,2	1148,5	18/8/96	
20NEU0047	25,6	7,72	1324	6,3	211,0	0,03	38,5	24,0	0,50	0,30	0,10	237,0	41,7	327,1	60,7	0,04	0,01	0,08	1,40	77,4	0,1	860,1	18/8/96	
20NEU0048	25,6	7,69	603	9,5	26,3	<0,01	41	28,0	0,60	0,30	0,20	29,0	5,0	275,9	48,2	0,03	0,01	0,09	0,70	71,8	0,1	402,7	18/8/96	
20NEU0049	26,1	7,92	1200	5,4	209,0	0,02	29,0	19,1	0,60	0,30	0,20	232,0	48,0	207,0	111,0	0,04	0,01	0,19	1,10	82,2	0,1	819,1	18/8/96	
20NEU0050	25,9	7,53	531	6,1	17,4	<0,01	52,9	22,8	0,40	0,20	0,10	11,3	1,2	293,5	11,1	0,31	0,13	0,35	0,80	66,2	0,1	335,5	18/8/96	
20NEU0051	26,0	7,68	1128	10,1	144,0	0,02	53,0	44,1	0,50	0,20	0,10	195,8	39,4	297,8	65,7	0,02	0,15	0,12	1,20	63,4	0,1	764,4	18/8/96	
20NEU0052		7,38	2190	14,2	283,0	0,02	61,0	45,2	0,20	0,20	0,20	430,7	36,0	380,0	104,4	0,09	<0,01	0,05	2,30	99,8	0,2	1284,5	28/8/96	
20NEU0053	27,0	7,62	1883	11,3	223,5	0,01	56,5	44,2	0,40	0,20	0,10	337,5	78,0	267,0	78,4	0,02	0,03	0,06	2,10	75,0	0,1	1036,8	18/8/96	
20NEU0055	26,0	7,88	1279	9,7	144,5	0,02	54,5	29,4	0,50	0,20	0,30	247,9	39,0	198,3	46,0	0,07	0,04	0,07	1,80	82,0	0,1	751,7	18/8/96	
20NEU0056	24,3	7,57	1690	16,1	201,5	0,01	60,5	44	0,40	0,20	0,30	342,4	27,2	321,9	34,2	<0,01	0,03	0,06	1,80	81,0	0,2	988,3	1/10/96	
20NEU0057	7,15	5680	14,3	743,0	0,02	331,0	100,3	0,20	0,30	0,40	1642,4	140,9	395,6	26,1	<0,01	0,22	0,08	6,00	61,6	0,2	326,8	28/8/96		

Tabela 3 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Neu Halbstadt)

Nro. de Poços	Temp. °C	pH	C.E. µS/cm	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD	Data
20NEU0058	25,4	7,26	2380	25,8	351	0,02	79,5	49,3	0,30	0,10	0,20	427,0	20,5	505,3	130,0	0,90	0,08	0,07	2,40	71,0	0,2	1404,2	1/10/96
20NEU0059	26,0	7,48	875	8,7	54,5	0,01	48,4	36,3	0,30	0,10	0,20	93,6	9,7	260,9	67,3	0,01	0,01	0,05	1,00	86,0	0,3	534,9	1/10/96
20NEU0060	24,0	7,65	1810	14,3	318,5	<0,01	37,5	33,1	0,50	0,20	0,30	368,7	31,4	393,6	75,6	0,07	0,04	0,10	2,90	84,0	0,3	1160,2	1/10/96
20NEU0061		7,73	465	3,3	9,6	0,02	58,8	13,7	0,30	0,10	0,30	18,1	13,2	225,2	2,4	0,03	<0,01	0,02	0,50	42,6	0,3	273,7	8/4/97
20NEU0065	26,7	7,63	827	4,1	20,2	<0,01	66,0	15,3	0,20	0,10	0,10	10,6	1,5	259,0	41,0	0,01	<0,01	0,01	0,60	94,0	0,2	371,4	24/7/96
20NEU0066	26,8	7,54	482	6,7	10,1	<0,01	42,9	19,1	0,20	0,10	0,20	24,8	1,6	164,8	51,0	0,02	<0,01	0,17	0,40	76,0	0,2	314,6	24/7/96
20NEU0067	25,8	7,62	480	7,2	7,2	<0,01	60,8	19,3	0,20	0,20	0,20	5,6	0,8	244,1	71,0	<0,01	<0,01	0,06	0,30	83,6	0,3	376,6	24/7/96
20NEU0068		7,61	587	6,6	27,6	0,03	49,8	24,1	0,30	0,30	0,10	32,0	9,3	270,9	27,8	0,02	<0,01	0,08	0,60	88,6	0,3	401,0	24/7/96
20NEU0069		7,84	828	5,6	71,2	0,02	60,0	21,6	0,10	0,30	0,20	103,5	5,5	284,4	29,8	0,11	<0,01	0,10	0,90	110,2	0,4	549,7	28/8/96
20NEU0070	25,5	7,41	787	11,3	31,8	<0,01	64,6	29,4	0,20	0,10	0,10	30,7	2,2	333,0	51,0	<0,01	0,02	0,40	0,70	101,0	0,3	466,8	24/7/96
20NEU0072	29,0	7,49	548	7,7	14,1	0,02	60,4	22,6	0,30	0,20	0,20	18,9	3,8	265,7	31,7	0,29	0,38	0,39	0,70	105,6	0,2	398,2	29/10/96
20NEU0073	25,5	7,27	434	9,7	27,6	<0,01	23,2	19,9	0,20	<0,1	0,90	29,4	2,9	146,4	62,0	0,01	0,61	0,37	0,40	88,0	0,3	346,5	24/7/96
20NEU0077		7,47	3230	28,8	482,0	0,02	96,8	57,8	0,20	0,40	0,30	732,4	115,5	393,6	165,2	2,39	11,20	8,20	3,30	68,4	0,1	1964,3	28/8/96
20NEU0078		7,07	3090	13,3	320,0	0,01	241,0	67,0	0,20	0,20	0,40	665,0	155,8	414,9	135,1	0,01	0,09	0,05	3,10	81,6	0,2	1867,2	28/8/96
20NEU0079	27,3	7,61	2150	9,3	371,0	0,02	47,0	33,4	0,60	0,10	0,20	381,0	41,5	448,0	108,0	0,34	0,03	0,21	2,00	99,0	0,1	1309,4	28/8/96
20NEU0090	25,0	7,41	3080	17,1	392,0	0,01	85,0	80,4	0,70	0,20	0,20	685,0	85,0	568,0	19,1	0,02	0,08	0,10	3,20	72,2	0,2	1706,9	24/7/96
20NEU0092	25,3	7,25	2350	46,0	201,5	0,02	145,0	55,1	0,60	0,30	0,10	461,0	39,0	401,0	130,3	0,01	0,13	0,06	2,50	85,0	0,2	1343,1	24/7/96
20NEU0093	26,1	7,16	4080	27,4	521	0,02	195	72,3	0,40	0,10	0,10	1039,0	104,2	323,4	254,2	0,02	0,21	0,07	4,10	66,0	0,1	2189,1	1/10/96
20NEU0094	24,3	7,74	784	6,2	41,2	0,02	77,8	19,9	0,20	0,30	0,20	88,0	8,4	244,0	72,7	0,03	0,01	0,02	0,80	72,3	0,2	421,2	24/7/96
20NEU0095	25,1	7,46	1162	23,1	106,0	0,01	75,0	23,6	0,30	0,20	0,10	158,9	96,0	235,0	58,0	<0,01	0,02	1,44	1,20	87,0	0,5	77,75	24/7/96
20NEU0098	26,8	7,51	1295	6	154,5	0,02	82,5	32,8	0,10	0,30	0,30	227,2	68,8	304,0	18,0	0,03	0,19	0,12	1,30	110,6	0,4	852,7	29/10/96
20NEU0099	26,9	7,22	5790	16,7	882,0	0,03	150,0	166,0	0,20	0,30	0,20	1478,5	230,9	476,0	179,2	0,04	0,11	0,03	5,90	103,2	0,4	3447,7	31/7/96
20NEU0091	26,8	7,55	3190	10,6	639	0,01	45	19,7	0,40	0,20	0,10	873,0	88	686,0	21,3	0,19	0,07	0,80	3,30	78,2	0,4	1988,5	29/10/96
20NEU0092	24,6	6,91	474	8,0	4,1	<0,01	58,8	20,8	<0,1	0,10	0,40	98,0	2,6	232,0	<0,5	<0,1	<0,1	0,48	0,30	90,0	0,2	336,3	26/7/96
20NEU0094	27,7	7,76	2040	16,6	520	0,03	31	14,8	0,50	0,50	0,20	861,0	80	488,7	5,2	0,03	0,14	0,54	2,50	77,8	0,2	1531,4	29/10/96
20NEU0096	28,5	7,18	2040	25,8	387,5	0,02	50	37,2	0,40	0,40	0,20	547,8	62	479,0	3,6	0,09	0,22	1,97	2,10	84,0	0,1	1449,0	29/10/96
20NEU0097	26,0	7,52	1395	15,7	235,5	0,01	36,0	4,5	0,40	0,20	0,40	217,0	30,0	320,0	11,3	<0,01	<0,01	4,11	1,00	95,2	0,3	809,1	26/7/96
20NEU0098	28,1	6,51	225	7,3	17,3	0,01	9,8	9,7	0,50	0,40	0,10	5,6	2,9	116,0	2,1	0,04	0,14	1,36	0,20	58,5	0,2	173,6	29/10/96
20NEU0100	26,0	7,07	560	9,8	11,2	0,01	81,2	10,1	0,20	0,30	0,40	8,4	2,8	332,6	4,2	0,02	0,20	1,23	0,80	66,0	0,3	390,3	31/7/96
20NEU0101	26,5	7,52	694	21,4	32,4	0,02	56	35	0,30	0,40	0,30	38,0	9,2	369,0	3,5	0,01	0,30	0,20	0,70	71,2	0,3	458,8	29/10/96
20NEU0102	28,0	7,11	2220	16,6	369,0	0,03	32,5	28,2	0,60	0,30	0,20	611,2	81,2	174,5	30,5	0,61	0,53	1,40	2,30	91,2	0,2	1373,0	29/10/96
20NEU0103	27,4	7,10	3880	17,4	494,5	0,03	258,0	113,2	0,50	0,40	0,30	647,8	412,2	390,5	31,6	<0,01	0,14	0,03	3,40	92,0	0,1	2363,7	31/7/96
20NEU0106	26,7	7,34	11590	197	1900	0,01	275	365	0,40	0,30	0,20	2998,0	1111	1101,0	2,3	0,12	1,33	0,60	11,7	68,6	0,1	7381,3	28/10/98
20NEU0107	22,0	6,92	231	10,1	3,2	0,10	30,7	7,0	0,10	0,30	0,40	22,0	6	103,0	3,5	<0,01	0,01	0,36	0,20	70,4	2,0	202,4	26/7/96
20NEU0109	25,0	7,73	408	14,7	51,8	<0,01	40,5	18,0	0,20	0,20	0,20	78,0	9,7	229,9	<0,5	0,01	<0,01	1,37	0,50	92,2	0,3	409,8	26/7/96
20NEU0110	20,3	7,59	544	30,3	52,1	<0,01	24,7	7,6	0,30	0,10	0,10	48,2	5,7	205,1	17,1	0,01	<0,01	1,14	0,60	66,6	0,3	355,8	26/7/96
20NEU0112	24,3	7,08	745	12,7	107,0	0,01	22,4	8,5	0,20	0,40	0,30	82,0	19,1	286,6	3,5	0,01	<0,01	2,33	0,60	82,0	0,2	653,2	26/7/96
20NEU0114		6,60	395	20,2	20,5	0,01	22,0	15,5	0,30	0,10	0,30	16,0	25,5	112,0	64,5	0,11	<0,01	1,87	0,50	29,6	0,3	272,7	8/4/97
20NEU0115	25,2	7,61	2930	4,2	556,0	0,01	60,0	29,9	0,40	0,20	0,10	613,5	81,9	597,7	133,0	0,02	0,05	0,05	2,70	74,0	2,0	1534,0	24/7/96
20NEU0117	26,0	7,39	904	17,2	52,8	0,01	78,6	31,6	0,30	0,20	0,10	85,4	22,1	375,3	3,2	<0,01	0,15	0,20	0,80	98,5	0,2	576,1	31/7/96
20NEU0118	28,5	7,52	2330	17,8	346	0,02	96	45,1	0,50	0,20	0,20	488,9	35,8	392,1	104,1	0,02	0,09	0,10	2,80	75,7	0,3	1968,0	13/9/96

Tabela 3 Análises químicas dos poços e reservatórios de infiltração do Chaco central (área Neu Halbstadt)

Nro. de Poços	Temp. °C	pH	C.E. µS/cm	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	TSD	Data
												mg/L											
20NEU0122	22,3	7,22	3260	40,4	265,0	0,01	106,0	57,2	0,20	0,10	0,30	428,0	75,0	424,1	59,0	0,12	0,14	0,50	2,30	62,0	0,2	1305,1	24/7/96
20NEU0123	25,4	7,50	2620	4,5	510,0	0,01	84,0	54,4	0,30	0,20	0,20	681,9	61,5	439,3	138,0	0,02	0,13	0,04	2,60	97,8	0,1	1851,8	24/7/96
20NEU0125	21,8	7,58	1820	2,8	292,5	<0,01	45,0	31,0	0,60	<0,1	<0,1	344,0	17,3	454,0	54,0	0,02	0,03	0,11	2,00	101,8	0,2	1114,7	24/7/96
20NEU0126	26,8	7,77	2460	3,0	503,0	0,02	29,5	13,4	0,10	0,10	0,10	465,0	37,7	510,0	111,0	0,01	0,01	0,24	2,30	69,6	0,3	1486,2	24/7/96
20NEU0127	26,1	7,27	2730	4,7	379,0	0,01	96,0	52,8	0,40	0,30	0,20	565,6	30,8	508,0	107,0	0,01	0,10	0,10	2,50	84,2	4,0	1577,6	24/7/96
20NEU0128	23,8	7,52	695	3,4	19,8	<0,01	81,2	20,5	<0,1	0,20	0,10	53,9	4,5	262,4	60,0	0,02	0,01	0,02	0,70	86,0	0,3	459,9	24/7/96
20NEU0130	23,2	7,77	2110	2,1	393,0	0,02	31,5	19,1	0,40	0,40	0,30	174,0	407,8	345,0	98,0	0,02	<0,01	0,13	2,20	95,0	0,3	1394,0	28/7/96
20NEU0131	22,2	7,46	1310	3,7	90,0	0,01	82,5	53,6	0,40	0,30	0,20	136,6	37,0	390,5	108,0	0,01	<0,01	0,08	1,40	97,4	0,2	803,5	26/7/96
20NEU0132	26,0	7,41	1210	2,1	123,5	0,01	76,0	29,0	0,30	0,20	0,10	175,0	22,2	384,4	16,6	<0,01	<0,01	0,09	1,30	93,6	0,2	728,3	26/7/96
20NEU0133	23,4	8,15	1890	15,2	328,0	0,01	34,5	15,6	0,50	0,10	0,40	354,5	12,3	408,8	63,4	0,01	0,22	0,41	1,90	118,8	0,3	1177,5	26/7/96
20NEU0134	26,0	7,60	1780	1,7	297,0	0,01	41,0	21,2	0,60	0,20	0,30	272,8	32,6	449,0	51,7	0,03	0,01	0,23	1,80	111,2	0,3	1653,5	28/7/96
20NEU0136	22,0	7,08	6600	6,8	852,0	0,03	322,0	49,6	1,10	3,00	0,20	1471,2	218,4	685,6	154,4	0,91	0,19	0,25	6,10	103,4	0,4	3534,9	28/7/96
20NEU0138	25,0	7,15	1610	91,2	112,0	0,01	175,0	41,3	0,30	0,10	0,20	390,3	166,2	280,7	35,4	0,03	0,08	0,08	10,00	59,6	0,1	1160,9	31/7/96
20NEU0139	27,7	6,93	13500	5,0	2510,0	<0,01	615,0	221,5	0,90	0,20	0,10	3635,0	1750,0	581,9	115,4	1,49	0,09	0,13	14,00	98,4	0,2	9148,3	31/7/96
20NEU0140	26,3	7,08	1033	4,2	184,2	0,01	81,8	24,4	0,40	0,30	0,40	238,2	88,3	257,0	2,6	0,05	0,04	0,23	1,10	114,6	0,4	847,4	31/7/96
20NEU0141	27,4	7,80	1570	9,7	141,5	0,02	119,0	40,5	0,50	0,40	0,30	296,0	40,2	333,0	96,2	0,04	0,05	0,10	1,70	98,0	0,3	968,3	31/7/96
20NEU0142	26,3	6,97	7790	11,9	1254,0	0,02	306,0	66,0	0,40	0,10	0,20	2098,0	341,0	710,9	3,9	0,08	0,13	0,40	7,90	99,0	0,2	4541,9	31/7/96
20NEU0144		8,02	1150	9,1	84,5	0,02	67,8	49,5	0,30	0,20	0,20	160,9	22,8	370,1	60,4	0,40	0,27	1,72	1,20	102,8	0,2	734,3	26/8/96
20NEU0145		7,84	3020	17,5	345,0	0,02	89,0	114,9	0,30	0,20	0,30	766,7	126,4	315,8	6,0	0,02	0,21	0,11	3,00	81,2	0,1	1738,3	26/8/96
20NEU0147	26,0	7,60	1473	6,3	236,0	0,02	36,0	24,9	0,20	0,20	0,20	282,1	74,9	352,4	5,0	0,45	0,10	0,10	1,50	65,0	0,3	877,0	18/9/96
20NEU0148	25,8	7,81	1589	7,0	226,0	0,02	54,5	33,5	0,30	0,20	0,30	334,4	16,4	349,1	23,4	0,86	0,10	0,60	1,70	75,2	0,3	946,2	19/9/96
20NEU0149	25,8	7,60	2020	17,1	327,0	0,01	72,0	53,0	0,30	0,30	0,20	460,5	43,6	363,1	99,8	0,03	0,05	0,07	2,00	77,0	0,4	1332,0	1/10/96
20NEU0150	25,5	7,11	2500	29,2	168,0	<0,01	245,0	75,2	0,20	0,20	0,30	577,5	70,2	358,5	208,4	0,01	0,25	0,19	3,00	61,0	0,3	1651,3	1/10/96
20NEU0151	27,0	7,65	1326	18,8	182,8	0,01	40,4	28,8	0,40	0,10	0,20	270,0	8,0	299,0	30,1	0,06	0,06	1,47	1,40	83,0	0,1	812,8	1/10/96
20NEU0153	28,4	7,48	1254	12,1	280,0	0,01	29,0	9,6	0,20	0,30	0,20	309,9	21,7	320,0	3,7	0,05	0,01	1,70	1,30	74,2	0,3	851,7	28/10/96
20NEU0156		6,52	2740	19,3	389,0	0,02	8,0	65,1	0,30	0,10	0,40	469,0	590,0	192,2	24,3	0,04	0,01	0,02	2,80	17,2	0,2	1680,4	8/4/97
20TJR0001	19,8	6,79	100	3,4	3,2	<0,01	9,3	2,3	<0,1	4,00	0,10	3,1	1,1	48,0	<0,5	0,50	0,01	0,31	0,10	46,2	0,3	90,9	26/7/96
20TJR0002	17,6	6,92	57	3,9	2,1	<0,01	4,6	1,9	<0,1	0,20	0,30	2,5	1,1	28,1	<0,5	0,04	0,07	0,37	0,10	47,4	0,2	79,3	26/7/96
20TJR0003	16,1	7,12	255	2,7	6,9	<0,01	31,0	5,6	<0,01	0,20	0,20	28,0	2,3	96,0	<0,5	<0,01	<0,01	0,07	0,18	53,8	0,2	178,1	26/7/96
20TJR0004	17,5	6,97	173	9,6	2,7	<0,01	18,4	3,4	<0,1	0,20	0,30	3,1	0,8	8,0	<0,5	0,02	0,38	0,23	0,10	56,2	0,1	138,2	26/7/96

Aclaração:

C.E. : Condutividade elétrica em µS/cm

20NEU0153 = N° de poço de cadastro

20TJR0004 = N° de reservatório de infiltração

K=Potássio; Na=Sódio; Li=Lítio; Ca= Cálcio; Mg=Magnésio; Sr=Estrôncio; Fe=Ferro; Mn= Manganês; Cl=Cloro; SO4=Sulfato;

HCO3=Bicarbonato; NO3=Nitrato; NO2=Nitrito; NH4=Amônia; PO4=Fosfato; B=Boro; SiO2= Silica; F=Fluor (em mg/L)

Total de sólidos dissolvidos (TSD-mg/L) é calculado.

Tabela 3.1 Análises químicas da água subterrânea dos poços de estudos (AUGER) de Neu Halbstadt

Nro. de Poços	pH	C.E. µS/cm	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	CO3	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	Data
											mg/L											
20NEU0624	7,27	5120	19,0	1464,0	0,02	74,0	81,0	0,3	0,2	0,3	1952,8	301,8	-0,10	701,7	-0,5	0,06	13,00	0,18	6,3	70,2	0,3	06.08.96
20NEU0625	7,59	22800	9,0	2670,0	0,02	480,0	86,0	0,2	0,2	0,3	4554,5	687,0	-0,10	710,9	-0,5	0,38	1,31	0,02	23,0	61,6	0,2	06.08.96
20NEU0626	6,83	34400	83,0	10150,0	0,02	420,0	970,0	0,3	0,2	0,3	16851,0	1811,5	-0,10	868,2	-0,5	0,50	5,80	0,11	35,0	53,2	0,1	07.08.96
20NEU0628		6560											-0,10							6,7	0,6	07.08.96
20NEU0629	7,31	1000											-0,10							9,0	0,4	07.08.96
20NEU0630	7,57	587	14,7	22,8	0,03	50,7	29,4	0,3	0,2	0,1	25,9	5,4	-0,10	330,8	-0,5	0,03	3,18	0,16	6,0	38,4	0,3	08.08.96
20NEU0631	7,48	5930											-0,10		-0,5					6,1	0,4	08.08.96
20NEU0634	6,93	47200	106,0	13760,0	0,03	340,0	778,0	0,3	0,3	0,3	20603,0	2693,0	-0,10	722,0	15,7	0,88	1,33	0,98	48,0	29,4	0,3	09.08.96
20NEU0635	7,09	19000	93,0	4275,0	0,20	415,0	348,5	0,4	0,2	0,2	6782,7	1290,5	-0,10	524,8	1,2	0,06	12,00	0,22	21,0	45,2	0,2	09.08.96
20NEU0640	7,82	4560	26,4	623,0	0,03	66,0	61,0	0,2	0,2	0,1	1020,0	73,4	-0,10	506,5	-0,5	0,06	12,60	0,25	4,7	48,2	0,2	10.08.96

Tabela 3.2 Análises químicas dos poços de monitoramento perfurados com máquina rotativa (PROMINAS) de Neu Halbstadt

Nro. de Poços	pH	C.E. µS/cm	K	Na	Li	Ca	Mg	Sr	Fe	Mn	Cl	SO4	CO3	HCO3	NO3	NO2	NH4	PO4	B	SiO2	F	Data
											mg/L											
20NEU0655	7,51	396	4,6	9	0,02	41,6	8,7	0,2	0,2	0,2	36,2	11,1	-0,1	131,2	4,3	0,24	6,01	0,38	0,4	55,8	0,1	08.04.97
20NEU0658	7,42	983	19,5	66,6	0,01	54,0	44,1	0,3	0,2	0,3	87,0	93,4	-0,10	225,0	77,7	0,08	0,10	0,02	0,9	36,2	0,2	08.04.97

Aclaração:

20NEU0658 = N° de poço

C.E. : Condutividade elétrica em µS/cm

K=Potássio; Na=Sódio; Li=Lítio; Ca= Cálcio; Mg=Magnésio; Sr=Estrôncio; Fe=Ferro; Mn= Manganês; Cl=Cloro; SO4=Sulfato;

HCO3=Bicarbonato; NO3=Nitrato; NO2=Nitrito; NH4=Amônia; PO4=Fosfato; B=Boro; SiO2= Silica; F=Fluor (em mg/L)

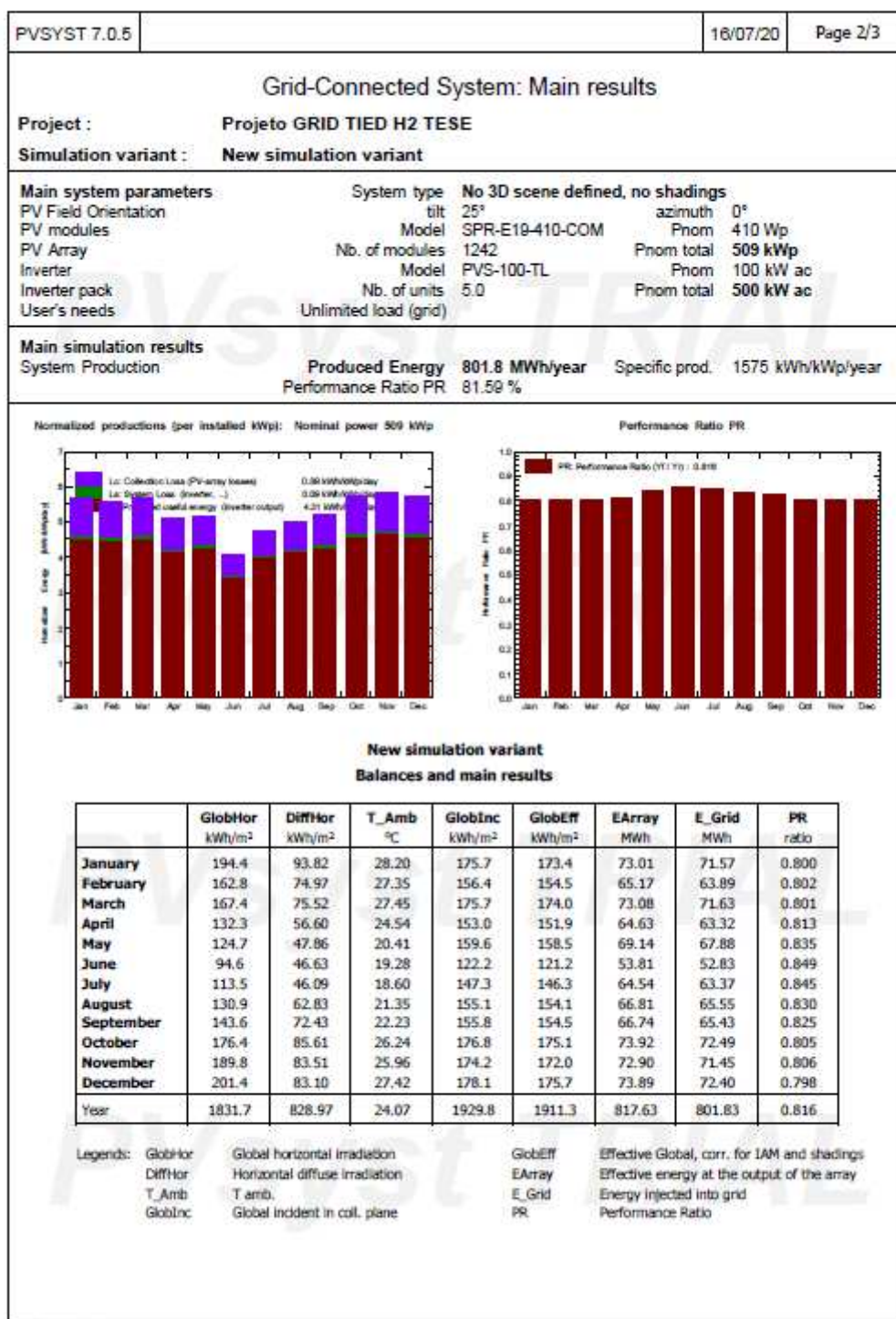
Total de sólidos dissolvidos (TSD-mg/L) é calculado

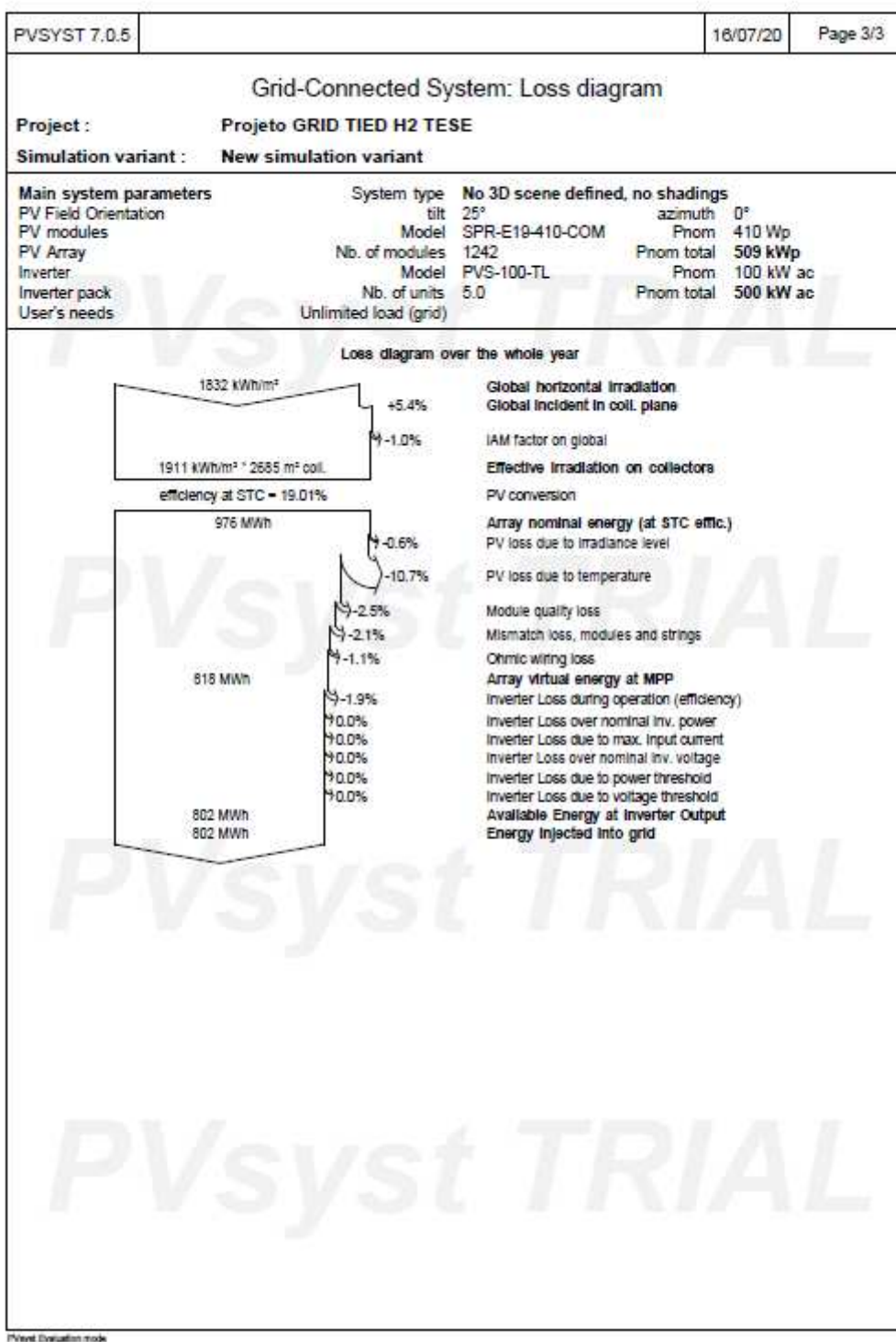
ANEXO E- Sistema SFV simulado em PVsyst

Fonte: PVsyst (2020).

PVSYST 7.0.5			16/07/20	Page 1/3					
Grid-Connected System: Simulation parameters									
Project : Projeto GRID TIED H2 TESE									
Geographical Site		Halbstadt_NASA	Country	Paraguay					
Situation	Latitude	-22.49° S	Longitude	-59.83° W					
Time defined as	Legal Time	Time zone UT-4	Altitude	122 m					
	Albedo	0.20							
Meteo data:	Halbstadt	Meteonorm 7.3 (1997-2013), Sat=100% - Synthetic							
Simulation variant : New simulation variant									
	Simulation date	16/07/20 22h17							
Simulation parameters	System type	No 3D scene defined, no shadings							
Collector Plane Orientation	Tilt	25°	Azimuth	0°					
Models used	Transposition	Perez	Diffuse	Perez, Meteonorm separate					
	Circumsolar								
Horizon	Free Horizon								
Near Shadings	No Shadings								
User's needs :	Unlimited load (grid)								
PV Array Characteristics									
PV module	Si-mono	Model	SPR-E19-410-COM						
Original PVsyst database	Manufacturer	SunPower							
Number of PV modules	In series	9 modules	In parallel	138 strings					
Total number of PV modules	nb. modules	1242	Unit Nom. Power	410 Wp					
Array global power	Nominal (STC)	509 kWp	At operating cond.	462 kWp (50°C)					
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	581 V	I mpp	794 A					
Total area	Module area	2685 m²	Cell area	2437 m²					
Inverter									
Original PVsyst database	Model	PVS-100-TL							
Characteristics	Manufacturer	ABB							
Inverter pack	Unit Nom. Power	100 kWac	Oper. Voltage	380-1000 V					
	Total power	500 kWac	Pnom ratio	1.02					
	Nb. of inverters	5 units							
Total	Total power	500 kWac	Pnom ratio	1.02					
PV Array loss factors									
Thermal Loss factor	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (wind)	0.0 W/m²K / m/s					
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	12 m·	Loss Fraction	1.5 % at STC					
Module Quality Loss			Loss Fraction	2.5 %					
Module mismatch losses			Loss Fraction	2.0 % at MPP					
Strings Mismatch loss			Loss Fraction	0.10 %					
Incidence effect (IAM): User defined profile									
	0°	50°	60°	65°	70°	75°	82°	88°	90°
	1.000	1.000	0.990	0.970	0.940	0.890	0.770	0.620	0.000

PVsyst Evaluation mode





APÊNDICE- Artigo publicado

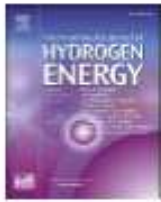
Fonte: Franco Leon et al. (2020).

INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 45 (2020) 5474–5480

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/he

Technical and economical design of PV system and hydrogen storage including a sodium hypochlorite plant in a small community: Case of study of Paraguay

David Rodrigo Franco León ^{a,b,*}, Carla Kazue Nakao Cavaliero ^a,
Ennio Peres da Silva ^c

^a Faculty of Mechanical Engineering FEM/UNICAMP, Brazil
^b Faculty of Engineering, National University of Asunción FIUNA, Paraguay
^c Interdisciplinary Center of Energy Planning NIPE/UNICAMP, Brazil

HIGHLIGHTS

- Hydrogen storage applied to autonomous industrial plant.
- Generation of sodium hypochlorite plus hydrogen from a renewable source.
- Use brackish groundwater to benefit an isolated community, social and economic benefits.
- Potential use of hydrogen as an energy vector.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history: Received 18 February 2019 Received in revised form 25 June 2019 Accepted 4 July 2019 Available online 1 August 2019 Keywords: Hydrogen Storage Sodium hypochlorite Photovoltaic Fuel cell Distributed generation	The increasing use of renewable power sources for distributed generation (DG) has made the application of storage systems a necessity to ensure the continuous supply. This paper analyzes technically and economically an autonomous sodium hypochlorite plant using a renewable energy source and a hydrogen storage system in the Western Region of Paraguay. In this region, there is abundant underground brackish water to produce industrial and energetic hydrogen. In addition, an isolated photovoltaic (PV) system feeds with electricity an electrolyzer, used for sodium hypochlorite production, and the brackish water and freshwater pumping systems. The hydrogen and fuel cell are used as backup system in the operation of the electrolyzer. Preliminary results show that hydrogen stored during the day can increase hypochlorite production by up to 31%. The PV solar system surplus can supply the demand of an off-grid community near the plant. The results show that the plant's return on investment (ROI) is 7 years. © 2019 Hydrogen Energy Publications LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

* Corresponding author. Faculty of Mechanical Engineering FEM/UNICAMP, Brazil.
 E-mail address: david.leon@fem.unicamp.br (D.R. Franco León).
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.059>
 0360-3199/© 2019 Hydrogen Energy Publications LLC. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

Hydrogen (H_2) as energy vector, has been increasingly adopted in several applications, especially associated with fuel cells (FC). In the transportation sector, electric vehicles with FC are in the market in some countries [1,2]. Even the mix of H_2 with other gases, such as methane, can be used in the internal combustion vehicles, as shown by Refs. [3–5].

In the electricity generation sector, distributed systems using a higher capacity of H_2 and FC plants are a reality in many countries. The use in a microgrid also avoids the losses by electricity transmission, considering that the units of consumption are very close to those of generation. It is precisely in the context of a microgrid generation that this paper is focused [6].

The high demand of sodium hypochlorite for several applications¹ [7,8] and the large import of this product by Paraguay [9] show the importance of looking for alternatives for its domestic production. Considering also the existence of regions with abundant brackish water in Paraguay [10] and the technological route of sodium hypochlorite production by electrolysis, this paper aims to analyze, from a technical and economic point of view, an autonomous production plant for sodium hypochlorite in the Western Region of Paraguay, known as Chaco. The electricity demand of the production plant will be met by a hybrid system composed by a photovoltaic (PV) power station and a fuel cell system powered by electrolytic H_2 .

Average insolation in the Chaco region

Fig. 1 shows Paraguay's average insolation and in the Chaco region (Latitude: -22.5 South and Longitude: -60.5 West). As can be seen in the figure, average daily insolation during the year in this region is $4.90 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ [11].

For comparison, the maximum and minimum values of the yearly global insolation² in Paraguay show higher values than some European countries such as Portugal, Spain and Italy, as shown between the dashed lines in Fig. 2. The boxes show the insolation values for cities in each country and the descending line represents the average in each country, available in the PVGIS database [12]. Fig. 2 also shows maximum ($2233.8 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$) and minimum ($1562 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$) values for Paraguay, obtained from Ref. [11].

According to the great potential of PV solar energy in the region, this renewable energy source was considered in electricity generation for the autonomous sodium hypochlorite production plant. It is used to extract saltwater and fresh water from the wells and to feed directly the electrolyzer adopted in the production of sodium hypochlorite and H_2 , which is stored. Then, this gas is converted back into electricity through the FC and supply the plant demand when the PV system production

is not enough. The electricity surplus can be directed to an isolated community located near the plant.

Methodology

The methodology consisted of three steps: (i) determination of the sodium hypochlorite plant production capacity; (ii) design of the electricity generation system to meet the demand for hypochlorite production; and (iii) economic analysis of the proposed system. For Step 1, a research was carried out on the demand and import of sodium hypochlorite from Paraguay, available from the last 10 years, to determine the plant production capacity. It was considered the total replacement of the annual import of this product estimated to 2018 to define the production capacity of the plant. In Step 2, the consumption of electricity was scaled for both the electrolysis plant and the external extraction of water used in the process. The PV solar plant was projected to provide electricity to the whole hypochlorite production during the day. The geographic location and minimum insolation required to supply the electricity consumption of the process during the whole year was considered in the PV plant projection. The H_2 produced was stored and used in electricity generation to supply the electrolyzer's demand when there was not enough solar energy or to increase production during the day. Thus, more income can be generated by the higher industrial production of hypochlorite. As a reference for H_2 production and electricity consumption in the electrolyzer, data from an existing plant in Mexico was employed [13]. Finally, once the hypochlorite plant was designed, economic profitability and investment studies were carried out for this industry [14] in Step 3. The analysis considered the sale of sodium hypochlorite to pay off the initial investment, as well as the PV solar plant. The socioeconomic benefit of the electricity supply to isolated community nearby the plant, from the surplus of generation, was not included in the presented economic study.

Plant modelling

In order to replace all the hypochlorite imported by the country, it was estimated the electricity consumption of the electrolyzer and H_2 production, since this equipment is what most demand this form of energy. In addition, the PV solar energy required for the brackish water pumping from the wells to the plant was calculated. The PV solar system was considered to meet the demand for electricity from the sodium hypochlorite production plant, which enables the surplus of electricity to be sent out of the plant, supplying an isolated community located nearby. The freshwater pumping system was also taken into account and the tables of the Seintech submersible pump manufacturer [15,16] were used. The PV solar design also considered electricity demanded to raise the water to the surface and then to the reservoir tank.

In the reference plant [13] a mixture of water and salt was carried out, but in this paper, it was considered that the brackish water available in Chaco already contains the requirements of salts and minerals, allowing it to only be filtered and introduced into the electrolyzer. The considered

¹ Sodium hypochlorite is a chlorine bleach widely used for foodstuff disinfection for human consumption, in the cleaning and purification of wastewater, in paper bleaching processes, etc.

² For countries located in South hemisphere, these values consider incidence on optimal angle oriented to the North. On the other hand, for countries of the North hemisphere, the orientation is to the South.

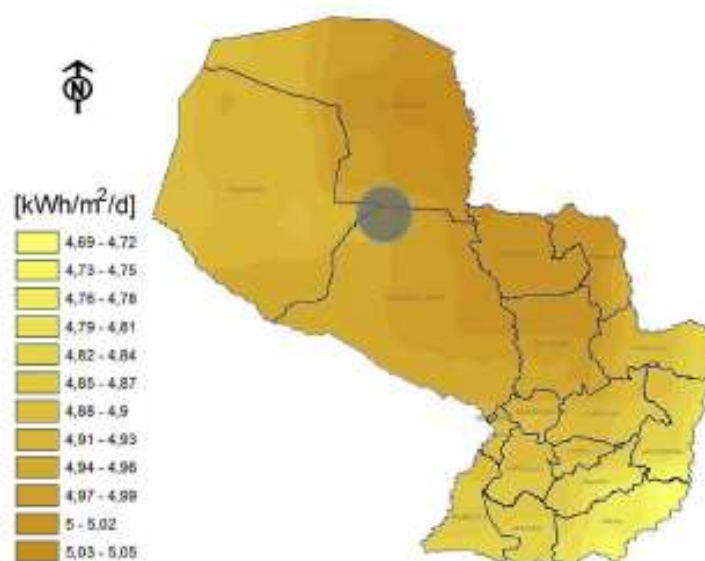


Fig. 1 – Insolation in Paraguay and the Chaco region suggested for plant installation. Source: obtained from Ref. [11].

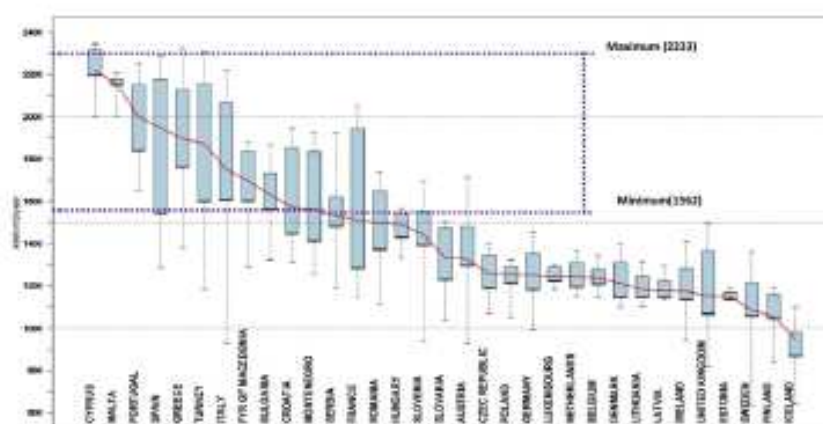


Fig. 2 – Comparison of EU countries yearly global radiation incident on optimally inclined PV modules & solar radiation incident on tilted angle optimal (max & min) in Paraguay. Source: obtained from [12].

plant operation included the concentrated brine re-saturation and recovery, filtered with sand and water. In addition, the purification was made with soda and carbonates. After these processes, it was introduced into the electrolyzer, where electricity was passed across the electrolytic cells to produce chlorine gas and H_2 . The chlorine gas was sent through pipes to react with soda and form the hypochlorite. After this, the spent brine comes out, where the chlorine is recovered and returns to the initial re-saturation. Although there are intermediate processes for the purification and recovery of brackish water, only the renewable

electrical input from the PV solar system was considered in this paper. The use of heat and vapors for treatment and filtration, which can be supplied with other sources that are beyond the scope of this paper (solar thermal, biomass or non-renewable), were not included. The study also did not consider the use of energy in the form of heat from the FC [17], only the energy used to electricity reconversion, whose efficiency was 50%. The H_2 production with direct connection with PV solar energy was also analyzed by Refs. [18,19]. The electrolyzer used was the alkaline type [20], with sodium chloride (NaCl) as electrolyte as presented in Ref. [21].

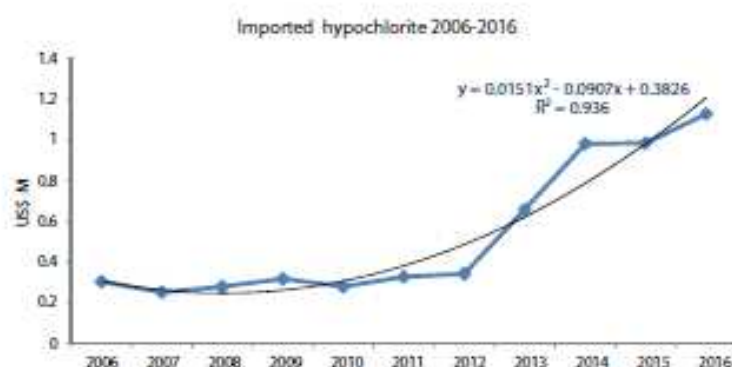


Fig. 3 – Paraguay's hypochlorite import curve. Reference: [9].



Fig. 4 – Insolation throughout the year in the region. Source: obtained from Ref. [22].

Finally, the total capacity of the PV solar plant was estimated considering all the electricity demands (electrolyzer, pumps and the possible surpluses to the community nearby) and their respective efficiencies. The minimum insolation registered by NASA at Chaco region is $2.93 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, with tilted north-facing surface, and was used for calculations, as it is the lowest value achieved during the day in the location [22]. H_2 was stored in gaseous form in pressurized tanks and then fed into the FC when needed. In the plant design was not considered the use of a compressor to achieve the tank storage pressure since the outlet pressure of the electrolyzer (30 bar) is enough for direct storage.

Results

According to the Paraguayan hypochlorite import data of the last 10 years, the blue curve of Fig. 3 was determined, as well as the function that best describes data behavior. The estimated demand for this product in 2018 was established considering the same function, as if there were no changes during the next two years.

At standard conditions, with an electrolyzer consumption of $53.4 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{H}_2$ and 2.93 Peak Sun Hours (PSH) it would be

necessary 716.25 kW to produce $39.3 \text{ kg} \cdot \text{day}^{-1} \text{H}_2$, but considering the electrolyzer efficiency of 70%, the total PV plant design was estimated as 1.03 MWp . The brackish water pump required 2.32 kWp and the freshwater pump, 1.84 kWp . The efficiencies used for calculations were taken from several authors [23–25]. Surplus PV solar energy, when produced, can be exported during the day to the nearby community. As shown in Fig. 4, the minimum value of PSH (2.93 PSH) is lower than the mean value of normal incident radiation throughout the year. Therefore, in this case the plant would be providing electricity to the community throughout the year.

Fig. 4 shows the historical data obtained over 30 years, between 1983 and 2013, which allow the estimate of the worst conditions even of shade. In Chaco Region this happens in May (during 7 days), June (12 days), and August (7 days) [22].

The extra daily production of electricity, considering the storage of H_2 in tanks and use in the FC, is about 31%, and it is reused in the hypochlorite production plant when there is no sun or when the panels are shaded in cloudy days. When the stored H_2 is not needed by excess of PV solar energy, it can be stored for use in the next day. Considering this case, the capacity of the tanks in the design was 54.5 kg H_2 . The results obtained are summarized in Table 1. A flowchart of the process, with the energy requirements, is shown in Fig. 5.

Table 1 – Estimates of electricity consumption in each system.

System	Equipment	Production or Storage	Requirements	Energy calculations	Energy/Power use	Efficiency (system)	Power from PV/FC Energy
PV Generation	Photovoltaic Plant System (panels, inverters and conductors included)	1.03 MWp installed (rounded value)	–	(1023.21 + 2.32 + 1.84)	–	–	1027.37 kWp
Hypochlorite Plant	Insolation	4.90 h day ⁻¹	2.93 h (2.93 PSH)	PSH = 1000 Wh m ⁻² day ⁻¹	–	–	–
	Electrolyzer	53.4 kWh kg ⁻¹ H ₂	2098.62 kWh	(53.4 × 39.3)/2.93	716.25 kWp	70%	1023.21 kWp
	Hydrogen Production	39.3 kg day ⁻¹	–	–	–	–	–
Pumped water	Brackish Pump	10.42 m ³ day ⁻¹ @ 120 m	10.42 m ³ day ⁻¹	1 × pumps (1.9 kWp) at 120 m	1.9 kWp	81.70%	2.32 kWp
	Freshwater Pump	9.6 m ³ day ⁻¹ @ 100 m	–	1 × pump (1.5 kWp) at 100 m	1.5 kWp	81.70%	1.84 kWp
Storage and Production	Hydrogen Tank	39.3 kg day ⁻¹ H ₂	–	–	–	–0.5% (energy stored loss per day)	–
	Fuel Cell	33.32 kWh kg ⁻¹ H ₂	267 kW	33.32 kWh kg ⁻¹ H ₂ × 39.3 kgH ₂ = 1309.47 kWh	1309.47 kWh	50%	654.74 kWh
Self-consume Stored	e.g. Extra production	(%) per day	2098.62 kWh + 11.37 kWh	654.74 kWh/(2098.62 + 11.37)	–	0.31 (more +31%)	–
Electricity to Community	lights, tv, fan, radio, etc.	When PSH more than 2.93 h per day	–	–	–	–	–

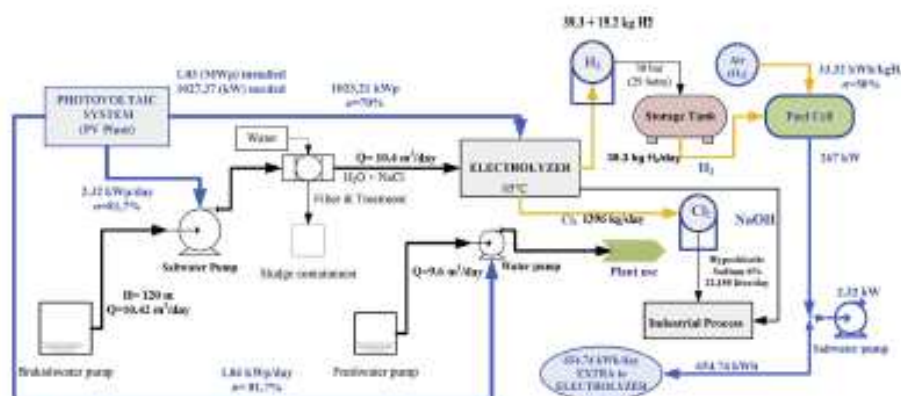


Fig. 5 – Flowchart of the industrial process of sodium hypochlorite integrated with hybrid system composed by isolated PV generation and FC with electrolytic H_2 .

Table 2 – Economic calculation of plant costs.

Equipment	Unit	Price		Quantity	Total US\$	References
		(min.) US\$	(max.) US\$			
PV system	kWp ⁻¹	1850	2780	1030	2,863,400	[26]
Electrolysis Plant	kW.Nm ⁻¹ .h ⁻¹	1161	3475	716.25	1,056,412	[27]
Hydrogen Tank	US\$.kg ⁻¹ at 30bar	257.35		54.5	14,026	[14]
Fuel Cell	US\$.kW ⁻¹	53	290	270	62,100	[14,28]
Raw Material for H_2 & NaOCl Production	day ⁻¹	560.6		300	168,171	[13]
Annual Production of Hypochlorite	litre ⁻¹	0.398	0.571	6,126,429	3,500,813	[29]
Cost of O&M (PV system)	kWinst ⁻¹ .year ⁻¹	15.4	38.1	1030	18,643	[26]
Cost of O&M (Plant)	litre ⁻¹ .year ⁻¹	0.187	0.275	6,846,650	1,824,948	[13,30]
Imported hypochlorite estimated (2018)	US\$.year ⁻¹				1,462,000	[9]
Total investment Cost	US\$				3,995,987	

The results of the economic study are presented in Table 2, which shows the initial costs of the equipment, namely the PV solar system, the electrolyzer, the hydrogen tank and FC according to the literature. Estimated local sales of sodium hypochlorite and annual plant operation and maintenance (O&M) costs were included in the study.

The values estimated to produce hypochlorite included the inputs for the daily capacity of 39.3 kg H_2 and 22,155 l of NaOCl, which are listed in Table 3. The costs considered the maximum prices for the initial investments of the PV solar plant, the electrolyzer and FC.

If the imported hypochlorite was produced locally, the return on investment (ROI) would be 7.02 years, according to cash flow with data of Table 2. It was considered in this

estimate a value-added tax (VAT) of 10% used in Paraguay, as well as the inputs to produce hypochlorite and H_2 annually, the annual O&M of the plant and of the PV solar system.

Conclusion

The paper presents an autonomous sodium hypochlorite plant that takes advantage of renewable energy and locally available inputs/products to meet its electricity demand. The plant has a daily production capacity of sodium hypochlorite of 22,155 l and 39.3 kg of H_2 , fed by a PV solar system of 102.37 kWp and a FC of 267 kW. According to the assumed premises, the results showed that from a technical point of view the coupling of the H_2 storage system (resulting from the production process) and conversion with a FC allowed to complement the electricity supply and guarantee the continuous plant requirements. From the economic point of view, due to the demand and the annual sodium hypochlorite import by Paraguay, the initial plant ROI would be of 7 years of continuous operation. The surplus of electricity generated can also be used to benefit the isolated community close to the plant; however, this benefit was not included in the presented economic study.

Table 3 – Feedstock to produce sodium hypochlorite. Source [13].

Feedstock per day		Unit
sodium thiosulfate	15	kg
caustic soda 50%	308.3	liters
Na_2CO_3	23.83	kg
HCl	173.3	liters

Acknowledgements

The financial support of BECAL (Programa Nacional de Becas de Posgrado en el Exterior Don "Carlos Antonio López", Paraguay Scholarships 31/2016) and Graduate Program in Energy Systems Planning (PSE/UNICAMP, Brazil) were fundamental for the development of this study and, therefore, we are thankful.

REFERENCES

- [1] Sulaiman N, Hannan MA, Mohamed A, Majlan EH, Wandaud WL. A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: issues and challenges. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:802–14.
- [2] Han Weiqun, Zhang Guofang, Xiao Jinsheng, Benard Pierre, Chahine Richard. Demonstrations and marketing strategies of hydrogen fuel cell vehicles in China. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39(issue 25):13859–72. ISSN 0360-3199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.138>.
- [3] Archer Sophie A, Steinberger-Wilckens Robert. Systematic analysis of biomass derived fuels for fuel cells. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43(issue 52):23178–92. ISSN 0360-3199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.161>.
- [4] Hou Xiao Sen, Zhang Xin, Hu Zhun Qing. Experimental and numerical study on engine fueled with different fractions of natural gas–carbon dioxide–hydrogen blends. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44(issue 11):5599–606. ISSN 0360-3199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.013>.
- [5] Yang Jinxin, Ji Changwei. A comparative study on performance of the rotary engine fueled hydrogen/gasoline and hydrogen/n-butanol. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43(issue 50):22669–75. ISSN 0360-3199. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.124>.
- [6] Haghi Ehsan, Raahemifar Kaamran, Fowler Michael. Investigating the effect of renewable energy incentives and hydrogen storage on advantages of stakeholders in a microgrid. *Energy Policy* 2018;113:206–22. ISSN 0301-4215. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.045>.
- [7] Correia-Sousa J, Tahaio AM, Silva A, Pereira T, Sampaio-Maia B, Vasconcelos M. The effect of water and sodium hypochlorite disinfection on alginate impressions. *Rev Port Estomatol Med Dent Cir Maxilofac* 2013;54(1):8–12.
- [8] Kalantari MH, Malekzadeh A, Emani A. The effect of disinfection with sodium hypochlorite 0.5% on dimensional stability of condensation silicone impression materials of speedex and irasil. *J Dent Shiraz Univ Med Sci* Sept 2014;15(3):98–103.
- [9] OEC - The Observatory of Economic Complexity- MIT. Products. Available at: <https://oec.world/en/>. Access in 25 July 2019.
- [10] Farfán S, Larroza F. Aprovechamiento de agua subterránea salada mediante tecnología no convencional para casos de emergencia por sequía, Chaco Central Paraguay. IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrogeología Subterránea. Argentina: Catamarca; 2016.
- [11] Viceministerio de Minas y Energía. Ministerio de Obras Públicas e Comunicaciones (MOPC). Energía solar y eólica en Paraguay. Available at: <http://www.ssmc.gov.py/vmmc/>. [Accessed 4 February 2019].
- [12] European Commission, Joint Research Centre. Institute for Energy, Renewable Energy Unit. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Web: <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/pvgis>. [Accessed 31 January 2019].
- [13] SEMARNAT. Secretaría De Medio Ambiente y Recursos Naturales, Mexico. Planta de hipoclorito de Sodio. Available from: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/jal/estudios/2007/14JA2007ID003.pdf>. [Accessed 18 May 2016].
- [14] Galeano Espinola M. Análise técnica e econômica da produção de hidrogênio eletrolítico no Paraguai. Campinas, SP: Tese de doutorado – Unicamp; 2013.
- [15] SEINETECH. Solar water pumping. Available from: <http://seinetech.com/en/>. [Accessed 18 May 2016].
- [16] IES. Instituto de Energía Solar. Patronos de consumo de agua en sistemas rurales de bombeo fotovoltaico (13/11/2003). http://138.4.46.62/8080/ies/ficheros/1_5_articulo_consumo_bombeo_2.pdf. [Accessed 18 May 2016].
- [17] Khan Shoukat Alam, Bicer Yusuf, Koç Musammer. Design and analysis of a multigeneration system with concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) and hydrogen storage. *Int J Hydrogen Energy* 2018;1–15. ISSN 0360-3199. In Press. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.047>.
- [18] Mraoui A, Benyoucef B, Hassaine L. Experiment and simulation of electrolytic hydrogen production: case study of photovoltaic electrolyzer direct connection. *Int J Hydrogen Energy* 2018;43(6):3441–50. ISSN 0360-3199. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.035>.
- [19] Nouicer I, et al. Solar hydrogen production using direct coupling of SO₂ depolarized electrolyser to a solar photovoltaic system. *Int J Hydrogen Energy* 2018;1–11. In Press. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.106>.
- [20] Kovac Anika, Dona Marciut, Budin Luka. Solar hydrogen production via alkaline water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy* 2019;44(issue 20):9841–8. ISSN 0360-3199. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.007>.
- [21] Bechtold T, Turcanu A, Campese R, Maier P, Schrott W. On-site formation of hypochlorite for indigo oxidation – scale-up and full scale operation of an electrolyser for denim bleach processes. *J Appl Electrochem* 2006;36:287–93.
- [22] NASA - National Aeronautics and Space Administration. POWER data access viewer. Available from: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Accessed 30 January 2019].
- [23] Feres Da Silva E. Fontes Renováveis de Energia. Editora Livraria da Física; 2014. p. 356.
- [24] Huggins R. Energy storage. Ed. Springer; 2010. p. 406. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1024-0>.
- [25] NREL/HE-6A1-46676. Current state-of-the-art hydrogen production cost estimate using water electrolysis. September 2009.
- [26] NREL National Renewable Energy Laboratory. U.S. solar photovoltaic system cost benchmark Q1 2017. DOE; 2017.
- [27] Campanholo TR. Metodologia para estimativa das emissões evitadas de gases de efeito estufa na geração de energia elétrica a partir do hidrogênio eletrolítico obtido a través da energia vertida turbinável. Campinas, SP: Tese de doutorado – Unicamp; 2016.
- [28] Wilson Adria, Kleen Gregory, Papa georgopoulos Dimitrios. Department of energy (DOE) hydrogen and fuel cells program record. Available from: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/17007_fuel_cell_system_cost_2017.pdf; November 30, 2017.
- [29] Secretaría de Defensa del Consumidor y el Usuario (SEDECO). SEDECO realizó análisis de precios de productos de la Canasta Básica. Paraguay. 2018. Available at: https://www.sedem.gov.py/index.php/noticias/620?ccm_paging_p=16.
- [30] Ministry of Micro, Small & Medium Enterprises MSME – Development Institute. Project profile on sodium hypochlorite. India. 2010. Available from: <http://msmedisgatala.nic.in/pdf/Project%20profiles.pdf>.