



ВЕТРО-СОЛНЕЧНАЯ ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ШТАТА СЕАРА, БРАЗИЛИЯ*

Е.М. до Сакраменто^{1}, А.Д. Салес¹, С.Дж. Оливейра¹, Т.Н. Везируглу²*

¹Физический факультет, Государственный университет Сеары
Форталеза, СЕ 60740-000, Бразилия

тел.: (55-85)3101-9902; e-mail: elimonsa@bol.com.br

²Институт чистой энергии, Университет Майами
а/я 248294, Coral Gables, Флорида 33124-0620, США

тел.: +1(305)284-46-66; факс: +1(305)284-47-92

doi: 10.15518/isjaee.2019.07-09.032-042

Заключение совета рецензентов: 25.08.17 Заключение совета экспертов: 10.01.18 Принято к публикации: 18.04.18

В этой статье предлагается программа использования энергии электролитического водорода для штата Сеара в Бразилии. Водород будет производиться с помощью панелей фотоэлектрических элементов и ветряных турбин. Генерируемый водород будет служить энергоносителем и применяться во всех областях, где сегодня используется ископаемое топливо. Были предусмотрены сценарии быстрого и медленного введения водорода и без введения водорода. Результаты показывают, что введение водорода, получаемого из возобновляемых источников энергии, увеличит потребление энергии и валовой внутренний продукт на душу населения в штате Сеара. В то же время это снизит уровень загрязнения, возникающего в результате сжигания ископаемого топлива, и, следовательно, повысит качество жизни населения такого федерального штата Бразилии.

Ключевые слова: солнечный ветер, водород; энергия водорода; штат Сеара.

A SOLAR–WIND HYDROGEN ENERGY SYSTEM FOR THE CEARÁ STATE—BRAZIL

E.M. do Sacramento^{a}, A.D. Sales^a, L.C. de Lima^a, T. Nejat Veziroglu^b*

^aDepartment of Physics, State University of Ceará
Fortaleza CE 60740-000, Brazil

tel.: (55-85)3101-9902; e-mail: elimonsa@bol.com.br

^bClean Energy Research Institute, University of Miami
Coral Gables, FL 33124, USA

tel.: +1(305)284-46-66; fax: +1(305)284-47-92

doi: 10.15518/isjaee.2019.07-09.032-042

Referred 25 August 2017 Received in revised form 10 January 2018 Accepted 18 April 2018

* до Сакраменто Е.М., Салес А.Д., Оливейра С.Дж., Везируглу Т.Н. Ветро-солнечная водородная энергетическая система для штата Сеара, Бразилия // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;07-09:32-42.

Ранее публиковалась в International Journal of Hydrogen Energy, 2008;33:5304-5311; doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.032

Copyright ©2008 International Association for Hydrogen Energy. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.



In this paper, a program of electrolytic hydrogen energy for the Ceará state in Brazil is proposed. Hydrogen will be produced through the assistance of photovoltaic cell panels and wind turbines. The generated hydrogen will serve as an energy carrier and will be used in every application where fossil fuels are being used today. The scenarios of fast and slow introduction of hydrogen and of no introduction of hydrogen were envisaged. Results indicate that the introduction of renewable energy hydrogen will increase the energy consumption and the gross internal product per capita of the Ceará state. In the same time it will reduce pollution originated from fossil fuels combustion and consequently will increase the quality of life of the population of such federal state of Brazil.

Keywords: solar-wind hydrogen; hydrogen energy; Ceará state.



Турхан Н. Везироглу
T.N. Veziroglu

Сведения об авторе: д-р наук (теплообмен), профессор, президент Международной ассоциации водородной энергетики, член 18 научных организаций.

Образование: Городской профессиональный колледж, Имперский колледж науки и техники (Великобритания), Лондонский университет по специальности «машиностроение» (1946 г.); доктор наук по теплообмену (1951 г.).

Награды: Лауреат нескольких международных наград.

Опыт работы: профессор, заведующий кафедрой технического факультета в университете Майами (1962–1979 гг.); директор Института чистой энергии (США), Coral Gables, Флорида (1974–2009 гг.); основатель и директор Международного центра технологий по водородной энергетике, Стамбул, Турция (2004–2007 гг.); почетный профессор университета Майами (2009 – по настоящее время); основатель и президент Международной ассоциации водородной энергетики (1976 – по настоящее время); почетный главный редактор Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE).

Область научных интересов: неустойчивость двухфазного потока; внутренняя теплопередача; солнечная энергия; глобальное потепление; экологические проблемы; возобновляемые источники энергии и система использования водородной энергии.

Публикации: более 350, редактор 160 книг и трудов конференций, соавтор книги «Солнечная водородная энергетика: сила, которая сохранит Землю».

Information about the author: Ph.D. in Heat Transfer, Professor, President of International Association for Hydrogen Energy, a member of 18 scientific organizations.

Education: the City and Guilds College, the Imperial College of Science and Technology, University of London with degrees in Mechanical Engineering, 1946, advanced studies in engineering, 1947; Ph.D. in Heat Transfer, 1951.

Awards: recipient of several international awards.

Experience: University of Miami, Engineering faculty, Department Chairman, Professor, 1962–1979; Clean Energy Research Institute, Coral Gables, FL, Director, 1974–2009; International Centre for Hydrogen Energy Technologies, Istanbul, Turkey, Founding Director, 2004–2007. University of Miami, Professor Emeritus, 2009–present. International Association for Hydrogen Energy, Founding President, 1976–present. Honorary Editor-in-Chief of the International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE).

Research interests: two-phase flow instabilities; interstitial heat transfer; solar energy; global warming; environmental problems; renewable energy sources and hydrogen energy system.

Publications: more than 350, editor of 160 books and proceedings, co-author of the book “Solar Hydrogen Energy: the Power to Save the Earth”.

1. Введение

Штат Сеара, расположенный в северо-восточной части Бразилии, имеет площадь около 148 825 км², что соответствует 1,74 % территории Бразилии. Валовой внутренний продукт (ВВП) этого штата составляет 1,9 % от ВВП Бразилии, в 2000 г. ВВП на душу населения в этом штате составлял 1 550 долл. США. Согласно BENCE (Энергетический баланс штата Сеара) [1] в 2000 г. потребление энергии Сеара составляло 3,57 млн т н.э. (тонн нефтяного эквивалента), или 0,17 ЭДж, что соответствует примерно 2,18 % энергопотребления Бразилии в тот год. Из этого общего объема около 33 % приходится на ископаемое топливо, 44 % – на гидроэнергетику, 13 %

– на древесину и древесный уголь, а остальные – на биомассу. Производство ископаемого топлива в штате Сеара незначительно, и электроэнергия поступает из других федеральных штатов Бразилии.

Основываясь на серии исследований о возможности производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии, правительство Бразилии запустило PROINFRA (Программу стимулирования альтернативных источников для получения электроэнергии). Основными целями PROINFRA являются диверсификация энергетического баланса Бразилии и изучение местного потенциала производства электроэнергии в каждом регионе Бразилии. Был подписан контракт на включение 3,3 ГВт электрической энергии в Национальную взаимосвязанную систему

(SIN), разделенную на энергию ветра (1,1 ГВт), когенерацию биомассы (1,1 ГВт) и малые гидроэлектростанции (1,1 ГВт). Штат Сеара будет рассматриваться с установкой некоторых новых ветряных электростанций, добавленных к уже работающим ветряным электростанциям в этом штате. Потенциал энергии ветра в штате Сеара составляет около 35 ГВт, что соответствует 40 % установленной мощности производства электроэнергии в Бразилии. Сеара был первым штатом в Бразилии, изучавшим ветроэнергетику, и в настоящее время здесь в эксплуатации находится ряд ветряных турбин, которые включают 27 МВт, распределенных на трех ветряных электростанциях.

Вследствие растущей цены на ископаемое топливо, которое в конце 2007 г. превысило 100 долл. США за баррель нефти, фотоэлектрическая солнечная энергия становится конкурентоспособной, и в штате Сеара, имеющим более 70 % неиспользованных земель, покрытых кустарником (Каатинга – один из крупнейших сухих лесов в Южной Америке) и среднюю инсоляцию около 6,7 ГДж / м² в год, формируются подходящие условия использования солнечной энергии для производства электроэнергии. Менее 1 % территории штата Сеара для установки фотовольтаических панелей будет достаточно для удовлетворения потребности в энергии в долгосрочном сценарии. Согласно Уинтеру [2], солнечные электростанции, расположенные в регионе с высоким уровнем инсоляции (в данном случае Сеара является примером), будут использоваться для преобразования солнечного излучения в тепло и электричество, причем последнее будет использо-

ваться в электролизе для расщепления опресненной и деминерализованной воды, а произведенный водород транспортироваться в газообразном виде к основной зоне потребления в трубопроводах, аналогично нынешней транспортировке природного газа. В процессе электролиза воды производится два продукта: водород и кислород. Таким образом, кислород может обеспечить прибыль и возврат капитала для проекта, поскольку этот продукт широко используется в больницах и во многих отраслях промышленности в регионе. В этом исследовании предлагается программа генерации электролитического водорода для штата Сеара с использованием солнечной и ветровой энергии. Предполагается построить здание ветроэнергетической опреснительной установки на побережье штата Сеара. Водород, произведенный с помощью фотоэлектрических элементов, будет храниться или транспортироваться и распределяться по подземным трубопроводам к потребителям. В основном в этой работе изучается возможность постепенной замены водородной энергией ископаемого топлива в энергетическом балансе штата Сеара.

Для того чтобы определить преимущества предложенной системы, модель была адаптирована для прогнозирования будущей тенденции важных энергетических параметров штата Сеара по сценариям с введением и без введения водорода. Исследуются такие параметры, как потребность населения в энергии, производство энергии, производство водорода, цены на энергию, валовой продукт, загрязнение воздуха и качество жизни.

Список обозначений

Буквы латинского алфавита

<i>A</i>	Площадь фотоэлемента
<i>B</i>	Электрическая энергия для опреснения
<i>C_f</i>	Стоимость ископаемого топлива
<i>C_h</i>	Стоимость водорода
<i>C</i>	Константа
<i>E</i>	Потребление энергии / спрос
<i>F</i>	Скорость производства (потребления) ископаемого топлива
<i>G</i>	Валовой продукт
<i>GER</i>	Электрическая энергия, генерируемая за счет ветра
<i>H</i>	Скорость производства (потребления) водорода
<i>P</i>	Загрязнение
<i>Q</i>	Население
<i>R</i>	Запасы ископаемого топлива
<i>S</i>	Солнечная инсоляция
<i>t</i>	Время
<i>U</i>	Загрязнение от ископаемого топлива на единицу энергии
<i>V</i>	Безразмерный модификатор времени удвоения
<i>W</i>	Безразмерный модификатор роста

Буквы греческого алфавита

Δ	Разница
δ	Доля ископаемого топлива, добываемого в год
ε	Отношение загрязнения, производимого водородом, к загрязнению, производимому ископаемым топливом
γ	Доля расхода топлива
η	Отношение эффективности использования водорода к эффективности использования ископаемого топлива
θ	Удвоение времени



Индексы нижние	
<i>av</i>	Средний
<i>c</i>	Составной
<i>d</i>	Потребность
<i>e</i>	Энергия
<i>el</i>	Электрический
<i>f</i>	Ископаемое топливо
<i>g</i>	Валовой продукт
<i>ger</i>	Генерируемая энергия
<i>h</i>	Водород
<i>n</i>	Число (год)
<i>0</i>	Начальный год
<i>p</i>	Производство
<i>pv</i>	Фотоэлектрический
<i>q</i>	Население
<i>r</i>	Безразмерное соотношение
<i>w</i>	Ветер

2. Формулирование модели

Была построена математическая модель ветро-солнечной водородной системы для штата Сеара, в основе которой лежит модель, разработанная Везируглу и Басаром [3] и адаптированная для многих регионов мира. Модель состоит из прогнозирования поведения различных переменных, относящихся к динамическому взаимодействию между энергетическими, демографическими, социально-экономическими и экологическими параметрами из анализируемого региона и мира. Подробное описание модели можно увидеть в различных статьях, опубликованных профессором Везируглу и его сотрудниками, для Ливии [4], Пакистана [5], Египта [6], Испании [7], Бразилии [8], Объединенных Арабских Эмиратов [9] и Саудовской Аравии [10].

В этой модели водород будет введен в энергетический баланс штата Сеара с экспоненциальной скоростью. Однако производство водорода будет ограничено спросом на топливо, потреблением топлива, производством ископаемого топлива, а также капиталом, доступным для инвестиций в заводы по производству водорода. Водород будет производиться путем электролиза обессоленной и деминерализованной морской воды. Как подчеркивалось ранее, из-за высокого потенциала энергии ветра в прибрежной зоне штата Сеара здесь предлагается использовать такую энергию в установке опреснения морской воды в форме электрической энергии. В солнечной части системы фотоэлектрическая батарея будет собирать солнечный свет и преобразовывать его в электричество. Будет установлен электролизер, использующий произведенное электричество для разделения воды на составляющие ее элементы – водород и кислород. Компрессоры будут обрабатывать водород до необходимого давления.

Согласно Везируглу и Басару [3], население страны или региона можно оценить по следующему уравнению:

$$Q_n = Q_{n-1} \exp[0,6931 \Delta t_n W_n / \theta_{q0}], \quad (1)$$

где Q_n – население в год t_n ; Q_{n-1} – население в год t_{n-1} ; Δt_n – временной интервал; W_n – модификатор прироста населения для временного интервала Δt_n ; θ_{q0} – начальное время удвоения прироста населения. Модификатор W_n является функцией безразмерных переменных, таких как валовой продукт на душу населения, коэффициент загрязнения, а также численность населения, или скученность. Выражение для W_n было оценено Eljrushi и Везируглу [4] следующим образом:

$$W_n = 1,3 - 0,22(G_{rqw})^{1,0} (P_{rw})^{0,1} (Q_{rw})^{0,5} - 0,08 / (G_{rqw})^{1,0} (P_{rw})^{0,1} (Q_{rw})^{0,5}. \quad (2)$$

Каждая из констант в формуле (2) определяется с учетом статистических данных для всего мира, и для региона применяется модель водородной энергии. Для случая штата Сеара Сакраменто [11] определил все константы – полученное выражение для модификатора W_n выглядит следующим образом:

$$W_n = 1,3 - 0,077(G_{rn})^{1,0} (P_{rn})^{0,1} (Q_{rn})^{0,5} - 0,228 / (G_{rn})^{1,0} (P_{rn})^{0,1} (Q_{rn})^{0,5}, \quad (3)$$

где коэффициент скученности $Q_{rn} = Q_n / Q_0$; коэффициент валового продукта на душу населения $G_{rn} = G_n Q_0 / G_0 Q_n$; коэффициент воздействия на окружающую среду $P_{rn} = P_n / P_0$.

Соотношение между потреблением энергии E_n в год t_n и E_{n-1} в год t_{n-1} можно выразить следующим образом:

$$E = E_{n-1} \exp[0,6931(\Delta t_n)(W_n)(1/\theta_{q0}V_{qn} + 1/\theta_{e0}V_{en})], \quad (4)$$



где V_{qn} и V_{en} – безразмерные модификаторы численности и прироста энергии времен удвоения θ_q и θ_e соответственно. По сути, модификатор V_q является функцией населения, а V_e – функцией цен на ископаемое топливо и водородную энергию, ресурсов ископаемого топлива и соотношения спроса на энергию на душу населения.

$$G_n = G_{n-1} \exp[0,6931(\Delta t_n)(W_n)(1/\theta_q V_{qn} + 1/\theta_e V_{en} + 1/\theta_g V_{gn})], \quad (5)$$

где θ_{g0} – компонент времени удвоения, относящийся к технологическому прогрессу; V_g – его модификатор, который является функцией коэффициента скученности.

В этой модели водород будет введен в энергетическую матрицу штата Сеара с экспоненциальной скоростью со временем удвоения θ_h . Однако производство водорода будет ограничено спросом на топливо, потреблением топлива, производством ископаемого топлива, а также капиталом, доступным для инвестиций в заводы по производству водорода. Производство водорода будет выражаться следующим уравнением:

$$H_n = H_{n-1} \exp(0,6931\Delta t_n / \theta_h), \quad (6)$$

где θ_{hn} – переменное время удвоения, представляющее введение водорода в энергетический баланс штата Сеара и обозначенное как

$$\theta_{hn} = C_1 + C_2(n-1), \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – константы, значения которых определяют сценарий, по которому вводится водород.

Количество ветряных турбин, необходимое для производства электроэнергии для опреснительной установки, будет определяться как

$$GER_n = B_{wn} / E_{ger}, \quad (8)$$

где B_{wn} – требуемая электрическая энергия в год t_n для опреснения морской воды; E_{ger} – энергия, генерируемая каждой ветряной турбиной.

Согласно Eljrushí и Везироглы [4], цена жидкого ископаемого топлива может быть выражена следующим образом:

$$C_{rjn} = 0,33 + 0,67(G_{rwn})^{0,2}(F_{rwn})^{0,5}(R_{rwn})^{0,5}, \quad (9)$$

где $C_{rjn}(= C_{jn}/C_{j0})$ – соотношение цен на ископаемое топливо; $G_{rwn}(= G_{wn}/G_{w0})$ – мировое соотношение внутреннего продукта; $F_{rwn}(= F_{wn}Q_{w0}/F_{w0}Q_{wn})$ – мировой коэффициент потребления ископаемого топлива на душу населения; $R_{rwn}(= R_{wn}/R_{w0})$ – мировой коэффициент использования ископаемого топлива.

Аналогичным образом получаем следующее соотношение для мировых цен на водород [4]:

В некотором смысле G (валовой внутренний продукт, как в случае со штатом Сеара) представляет собой измерение общего объема производства товаров и услуг нации или одного конкретного региона, обозначая его экономическую активность и доход. Отношения между G_n в год t_n и G_{n-1} в год t_{n-1} также можно выразить в следующей форме:

$$C_{rhn} = 0,2 + 0,8(G_{rwn})^{0,2}(F_{rwn})^{0,4}(H_{rwn})^{0,3}, \quad (10)$$

где $C_{rhn}(= C_{hn}/C_{h0})$ – соотношение цены водорода; $H_{rwn}(= H_{wn}/H_{w0})$ – мировой коэффициент производства водорода. Составное соотношение цены на энергоносители может быть определено следующим образом [4]:

$$C_{rcn} = \gamma_{jn}C_{rjn} + \gamma_{hn}C_{rhn}, \quad (11)$$

где $C_{rcn}(= C_{rn}/C_{r0})$ – совокупное соотношение цены на энергию; $\gamma_{jn}(= F_{wn}/E_{wn})$ – доля мирового потребления ископаемого топлива; $\gamma_{hn}(= \eta_r H_{wn}/E_{wn})$ – доля мирового потребления водорода (как доля от общемирового энергопотребления).

Общая площадь фотоэлектрических элементов, необходимая для удовлетворения общего производства водорода, определяется как [4]

$$A_{hn} = H_n / \eta_{pv} \eta_{el} S_{av}, \quad (12)$$

где H_n – производство водорода в год t_n ; η_{pv} – общая эффективность фотоэлектрической установки; η_{el} – эффективность работы электролизера; S_{av} – среднегодовая солнечная инсоляция на единицу площади фотоэлектрических панелей.

Загрязнение, вызванное использованием ископаемого топлива и водорода, можно записать следующим образом [4]:

$$P_n = U(F_{dn} + \varepsilon H_n), \quad (13)$$

где P_n – количество загрязнения в год t_n ; U – загрязнение на единицу потребленной ископаемой энергии; F_{dn} – потребность в ископаемом топливе в год t_n ; ε – отношение загрязнения, произведенного водородом на единицу энергии водорода, к загрязнению, произведенному ископаемым топливом на единицу энергии; H_n – производство водорода в рассматриваемом году. Для оценки долгосрочного воздействия на окружающую среду использования ископаемого топлива и последующего сокращения выбросов парниковых газов и выпадения кислотных дождей из-за использования водорода в энергетическом балансе штата Сеара, коэффициент выбросов каждого загрязняющего вещества был установлен в единицах потребляемой энергии. Учитывая данные ICF Кон-



салтинг [15] по транспортному сектору, средний коэффициент выбросов CO₂ составляет: 72,86 кг / ГДж; CH₄ – 0,0054 кг / ГДж; SO_x – 0,4 кг / ГДж; а NO_x – 0,0132 кг / ГДж.

Согласно Лютфи и Везироглу [5], качество жизни будет повышаться с увеличением валового продукта, а с ростом населения и загрязнением – снижаться. Принимая это во внимание, показатель качества жизни L_n можно выразить следующим образом:

$$L_n = (G_{rn}) / (P_{rn})(Q_{rn}). \quad (14)$$

где G_{rn} , P_{rn} и Q_{rn} – параметры, нормализованные с соответствующими начальными значениями.

3. Данные и вычисления

Отправной точкой в этом моделировании является 2000 г., а охватываемый период времени продолжается до 2110 г. Следующие начальные условия, времена удвоения и коэффициенты были вычислены или взяты из литературы.

Население мира и время удвоения населения [10]

$$Q_{w0} = 6,1 \cdot 10^9, \quad \theta_{q_{w0}} = 59 \text{ лет.}$$

Компонент потребления энергии из ископаемого топлива и удвоения времени потребления энергии благодаря усилиям по повышению уровня жизни [12]

$$E_{w0} = 0,21 \cdot 10^9 \text{ ТДж/г, } \theta_{e_{w0}} = 92 \text{ года.}$$

Ресурсы ископаемого топлива [9] и доля оставшихся ресурсов ископаемого топлива, которые добываются за год [6],

$$R_{w0} = 5,99 \cdot 10^9 \text{ ТДж, } \delta_w = 0,035 / \text{лет.}$$

Скорость производства водорода и отношение эффективности использования водорода к эффективности использования ископаемого топлива [10]

$$H_{w0} = 3,2 \cdot 10^6 \text{ ТДж/г, } \eta_w = 1,35.$$

Цена жидкого ископаемого топлива (цена бензина / л на АЗС) [13] и цена сжатого водорода [14]

$$C_{f0} = 8,00 \text{ долл. США / ГДж;}$$

$$C_{h0} = 22,00 \text{ долл. США / ГДж.}$$

Валовой мировой продукт и компонент удвоения валового мирового продукта вследствие технологических достижений [11]

$$G_{w0} = 45 \cdot 10^{12} \text{ долл. США; } \theta_{g_{w0}} = 57 \text{ лет.}$$

Коэффициенты загрязнения U и соотношение загрязнения ε [12]

$$U = 73,28 \text{ кг / ГДж ископаемого топлива; } \varepsilon = 0,04.$$

Население штата Сеара и время удвоения населения [16]

$$Q_0 = 7,43 \cdot 10^6 \text{ долл. США; } \theta_{q_0} = 40 \text{ лет.}$$

Потребление топлива и компонент времени удвоения расхода топлива благодаря усилиям по повышению уровня жизни [1]

$$E_0 = 0,17 \text{ ЭДж; } \theta_{e_0} = 17 \text{ лет.}$$

Запасы ископаемого топлива и доля оставшихся запасов ископаемого топлива, которые добываются за год [1],

$$R_0 = 110,24 \text{ ПДж; } \delta = 0,035 / \text{год.}$$

Предполагая, что производство водорода за счёт ветровой и солнечной энергии начнется в 2015 г., темпы производства водорода будут составлять:

$$\text{для } 2000 \text{ г. } \leq t < 2015 \text{ г., } H_n = 0;$$

$$\text{для } t = 2015 \text{ г., } H_n = 1,7 \cdot 10^6 \text{ ГДж / год.}$$

Были выбраны три разные скорости времени удвоения водорода:

- 1) $\theta_{hn} = 2,0 + 0,2(n - 1)$ – быстрое введение водорода;
- 2) $\theta_{hn} = 2,0 + 0,25(n - 1)$ – медленное введение;
- 3) $\theta_{hn} = \infty$ – водород не вводится.

Среднегодовая глобальная солнечная инсоляция в Сеаре [17]

$$S_{av} = 6,7 \text{ ГДж} \cdot \text{м}^2 / \text{год.}$$

Валовой внутренний продукт, обусловленный нормальным ростом, и компонент времени удвоения валового внутреннего продукта, обусловленный достижениями в области технологий и производительности [18],

$$G_0 = 11,5 \cdot 10^9 \text{ долл. США; } \theta_{g_0} = 57 \text{ лет.}$$

Коэффициенты загрязнения U и соотношение загрязнения ε [12]

$$U = 73,28 \text{ кг / ГДж ископаемого топлива; } \varepsilon = 0,04.$$



4. Результаты и обсуждение

Как обсуждалось ранее, в этом исследовании предусмотрены три сценария. Первый – это система, в которой ветро-солнечная водородная энергетическая система вводится в энергетический баланс штата Сеара по так называемому сценарию быстрого введения водорода. Скорость введения водорода для замены ископаемого топлива в Сеаре определяется параметром удвоения времени θ_{hm} . Как видно из уравнения (7), время удвоения существенно влияет на количество образующегося водорода, и, если диапазон изменения времени удвоения невелик (например, от 2 лет до 21 года, как показано на рис. 1), введение водорода в энергетическую систему считается быстрым по сравнению с двумя другими сценариями. Во втором сценарии время удвоения увеличивается от первоначального значения 2 года в 2000 г., когда запускалась эта предлагаемая ветро-солнечная водородная энергетическая система, до конечного значения 26 лет в 2110 г., когда полное внедрение водорода в энергетический баланс Сеары будет завершено. Второй сценарий обозначен как сценарий «медленного введения водорода». В третьем случае время удвоения считается бесконечным, и по сценарию водород никогда не будет введен.

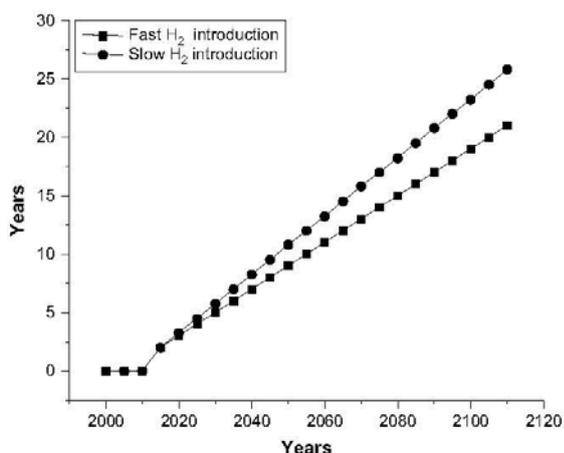


Рис. 1 – Удвоение времени производства водорода по сравнению со временем
Fig. 1 – Doubling time of hydrogen production vs. time

Как видно на рис. 2, до 2050 г. население штата Сеара будет расти одинаково независимо от рассматриваемого сценария. После этого года сценарии быстрого и медленного введения водорода способствуют большей скорости роста населения, и к 2080 г. численность населения стабилизируется на 15,2 млн человек. Применяемая модель полностью соответствует прогнозу численности населения Бразильского института географии и статистики (IBGE) до 2020 г. [18]. В сценарии без введения водорода население достигнет максимума в 13,8 млн человек к 2060 г. Это указывает на то, что более низкий уровень загрязнения и более высокие показатели качества жизни

ни обеспечивают лучшие условия для увеличения численности населения.

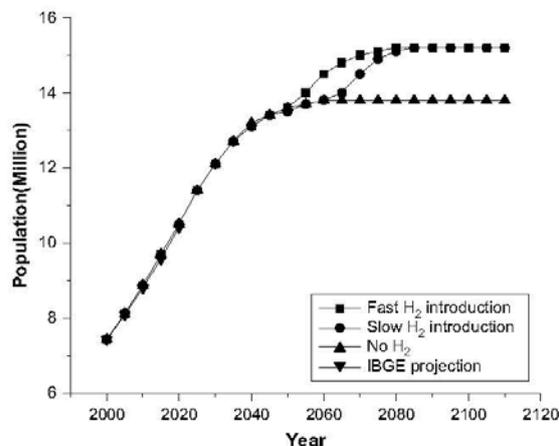


Рис. 2 – Прогноз численности населения в штате Сеара
Fig. 2 – Population projection for the Ceará state

Что касается будущей потребности в энергии штата Сеара (рис. 3), то в ситуации, когда водород не вводится, потребность в энергии достигнет значения насыщения 1,88 ЭДж к 2060 г., а в двух других ситуациях пиковое значение 2,33 ЭДж будет достигнуто к 2075 г. Это в значительной степени отражает тот факт, что введение водорода в энергетический баланс штата Сеара может способствовать установлению более высокого уровня жизни его населения.

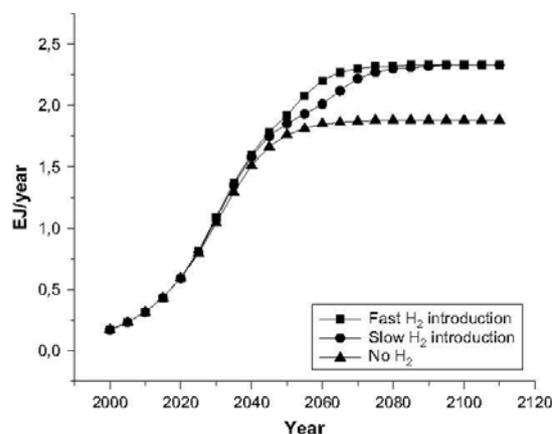


Рис. 3 – Прогноз спроса на энергию для штата Сеара
Fig. 3 – Energy demand projection for the Ceará state

Валовой внутренний продукт на душу населения в штате Сеара по неводородному сценарию увеличится примерно до 15 000 реалов (2 000 дол. США) в 2060 г. (рис. 4). В обоих сценариях введения водорода пик в размере 18 500 реалов будет достигнут примерно в 2080 г. Эта разница в основном связана с более высокой эффективностью использования и гораздо меньшим ущербом для окружающей среды ветро-солнечной водородной энергетической системы.



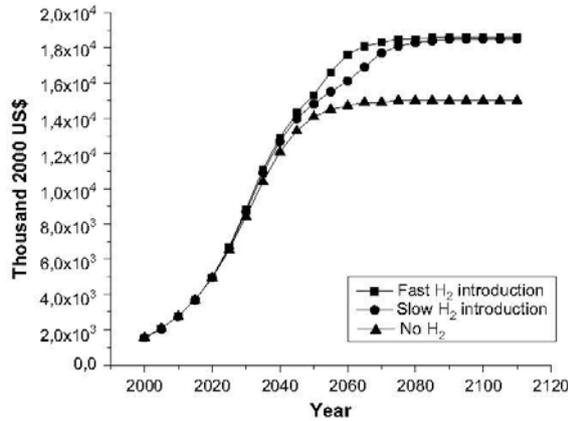


Рис. 4 – Валовой внутренний продукт на душу населения в штате Сеара
 Fig. 4 – Gross internal product per capita for Ceará state

ископаемого топлива составит около 13 дол. США за ГДж и к 2080 г. достигнет приблизительно 18 дол. США за ГДж.

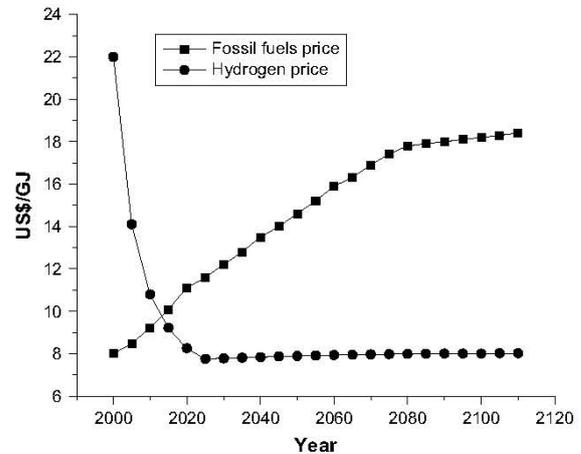


Рис. 5 – Прогноз цен на водород и жидкое ископаемое топливо
 Fig. 5 – Hydrogen and fluid fossil fuels price projection

На рис. 5 показана временная динамика цен на ископаемое топливо и водородную энергию. Стоимость производства водорода к 2000 г. – это цена производства 1 ГДж ветро-солнечной водородной энергии в штате Сеара, которая оценивается приблизительно в 22 дол. США, что примерно в три раза выше стоимости энергии 1 ГДж жидкого ископаемого топлива. Однако к 2015 г. стоимость обоих видов топлива будет одинаковой, и прогнозы показывают, что к 2025 г. стоимость водородной энергии достигнет 9 дол. США за каждый ГДж, а стоимость энергии

на рис. 6 и 7 показана временная динамика производства энергии водорода, потребность в ископаемом топливе и общая потребность в энергии для каждого сценария введения водорода.

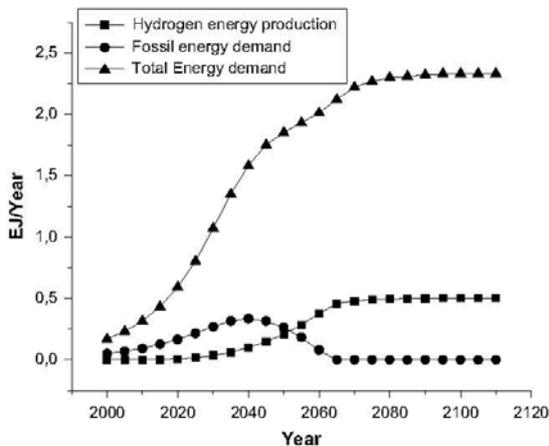


Рис. 6 – Производство энергии из водорода, спрос на ископаемую энергию и общая потребность в энергии (медленное введение H₂)
 Fig. 6 – Hydrogen energy production, fossil energy demand and total energy demand (slow H₂ introduction case)

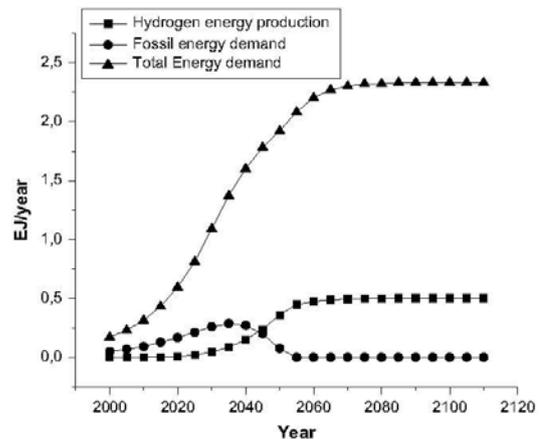


Рис. 7 – Производство энергии из водорода, потребность в ископаемой энергии и общая потребность в энергии (быстрое введение H₂)
 Fig. 7 – Hydrogen energy production, fossil energy demand and total energy demand (fast H₂ introduction case)

За начальный год общая потребность в энергии достигает значения 0,17 ЭДж, тогда как потребность в жидком ископаемом топливе составляет 0,050 ЭДж. В общую потребность в энергии включены различные источники энергии, такие как спирты, уголь, нефть, природный газ, керосин, электричество и другие. В потребность на ископаемое топливо входят промышленное масло, дизельное топливо, бензин и СНГ.

Как видно на рис. 6, для сценария медленного введения водорода спрос на ископаемое топливо увеличивается до 2040 г., достигая значения 0,33 ЭДж и снижаясь до нуля в 2065 г., когда он будет полностью замещен водородом. Водородная энергия будет введена в энергетическую матрицу штата Сеара к 2015 г. и постепенно заменит жидкое ископаемое топливо, достигнув пика производства в 2095 г. со



значением 0,50 ЭДж, что соответствует примерно 21,5 % от общей потребности Сearы в энергии в том году. Быстрый сценарий внедрения водорода, представленный на рис. 7, показывает, что пик жидких ископаемых видов топлива в 2035 г. уменьшится до нуля к 2055 г., когда водородная энергия полностью его заменит.

На рис. 8 показана динамика импорта ископаемых видов топлива, общего спроса на энергию и производство ископаемых видов топлива по сценарию без введения энергии водорода в энергетическую матрицу штата Сearа. Импорт энергии увеличится до 0,56 ЭДж к 2060 г., достигнув стабилизации в результате повышения цен и истощения. Производство ископаемого топлива сохраняет постоянное значение 0,0036 ЭДж, потому что штат Сearа до сих пор не показывал значительных запасов ископаемого топлива [1].

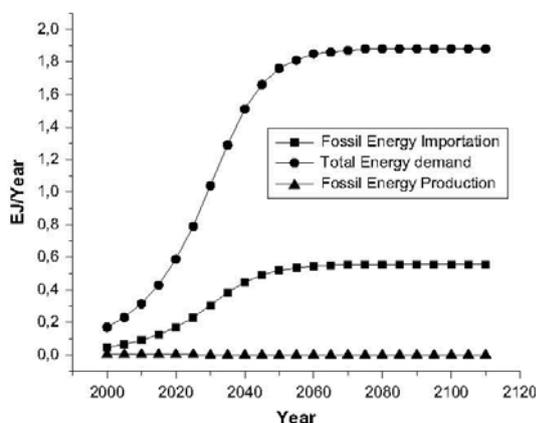


Рис. 8 – Импорт ископаемой энергии, общий спрос на энергию и производство ископаемой энергии (без H₂)
 Fig. 8 – Fossil energy importation, total energy demand and fossil energy production (No H₂ case)

На рис. 9 продемонстрирован эффект от введения энергии водорода на потребность в жидком ископаемом топливе. До 2015 г. поведение всех кривых будет одинаковым, поскольку водород начнут производить только в 2015 г. Для сценария быстрого введения водорода спрос достигнет пика в 2035 г. со значением 0,29 ЭДж, уменьшающимся до нуля к 2055 г., в котором штат Сearа достигнет полной независимости от жидких ископаемых видов топлива. В сценарии медленного введения спрос на жидкие ископаемые виды топлива достигнет пика в 2040 г. со значением 0,33 ЭДж в 2065 г. Для сценария без введения энергии водорода спрос на жидкие ископаемые виды топлива достигнет пика к 2085 г. со значением 0,56 EJ.

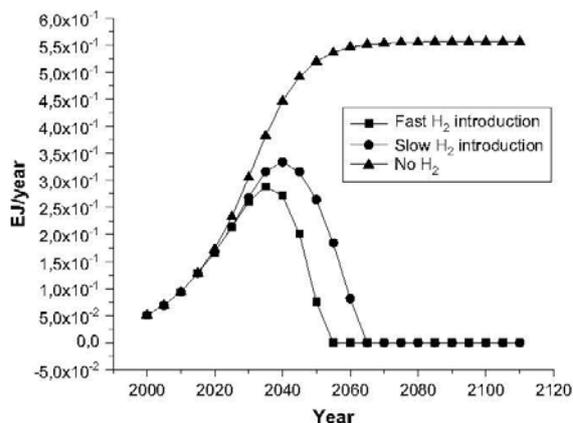


Рис. 9 – Влияние введения водорода на спрос на ископаемую энергию
 Fig. 9 – Effect of hydrogen introduction on fossil energy demand

На рис. 10 показан доход, полученный в результате продажи кислорода клиентам, которые используют его в своих производственных процессах.

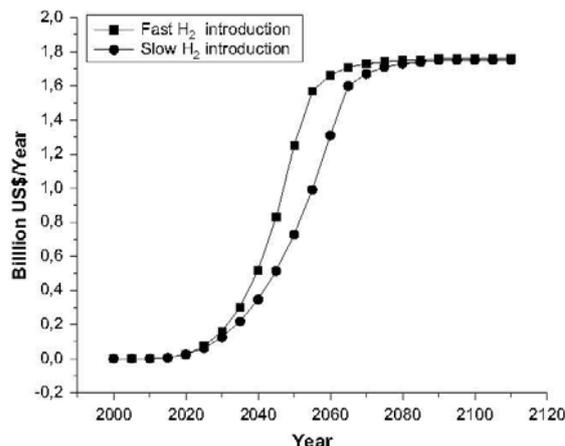


Рис. 10 – Доход за побочный продукт (кислород) в зависимости от времени
 Fig. 10 – By-product credit for oxygen vs. time

Это будет побочным продуктом электролиза обессоленной морской воды. В первый год внедрения водорода доход на кислород составит 5,95 млн долл. США. Обе ситуации с введением водорода указывают на 1,75 млрд долл. США к 2080 г. Произведенный кислород будет продаваться на внутренний рынок штата Сearа. На рис. 11 показаны доход, полученные в результате коммерциализации водорода произведенного за счёт солнечной ветровой энергии. За первый год внедрения водорода будет получено 36 млн долл. США. Прибыль составит 3,92 млрд долл. США к 2080 г. для обоих сценариев введения водорода.



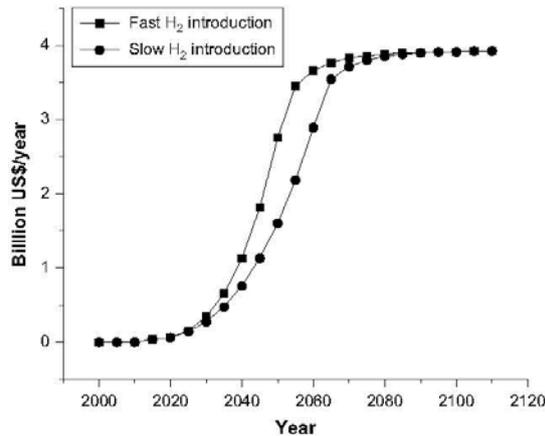


Рис. 11 – Доход от продажи водорода в зависимости от времени
Fig. 11 – Income from hydrogen sale vs. time

Опреснительная установка будет размещаться в прибрежной зоне штата Сеара с электрическим питанием от ветряных турбин. На рис. 12 показано изменение количества ветряных турбин, необходимого ветряной электростанции для выработки электроэнергии в процессе опреснения морской воды. В первый год для производства водорода потребуется только 1 ветряная турбина. В 2080 г. после стабилизации потребуется 32 ветряные турбины номинальной мощностью 2,3 МВт.

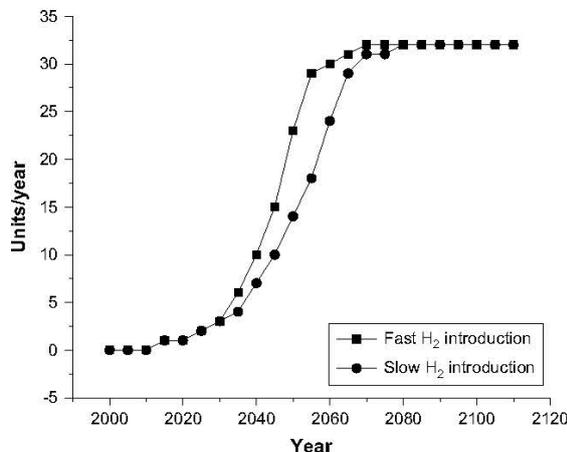


Рис. 12 – Общее количество ветрогенераторов в зависимости от времени
Fig. 12 – Total of wind generators vs. time

Необходимую электрическую энергию для правильного обеспечения процесса электролиза получают от фотоэлектрических панелей, установленных во внутренней области штата Сеара, являющихся линиями электропередачи действующей коммунальной компании. На рис. 13 показана проекция необходимой площади для фотоэлектрических панелей. Предполагается, что общая площадь земли будет в три раза больше, чем проектируемая площадь для

фотоэлектрических панелей, чтобы избежать затенения и облегчить обслуживание. Первоначально в 2015 г. занимаемая фотоэлектрическими панелями площадь будет составлять 8,25 км². В 2055 г. в случае медленного введения водорода потребовалось бы 586 км² площади для фотоэлектрических панелей и 928 км² в случае быстрого введения водорода. Для обоих сценариев в 2080 г., когда система будет завершена, потребуется площадь 1 040 км², что соответствует 0,69 % поверхности штата Сеара. Общая площадь земельного участка составит около 3 000 км².

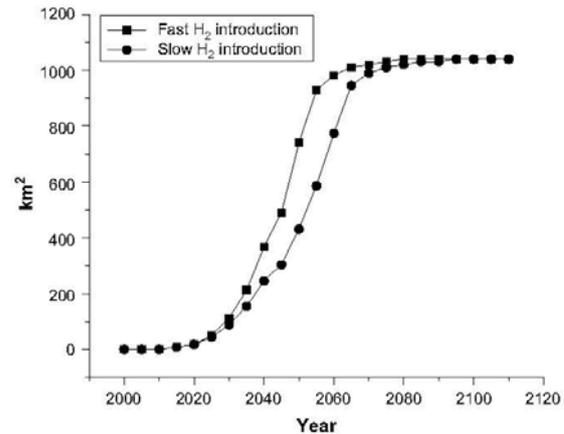


Рис. 13 – Общая площадь фотоэлементов в зависимости от времени
Fig. 13 – Total PV cell area vs. time

Возможное и будущее воздействие на окружающую среду и показатель качества жизни штата Сеара с точки зрения использования ископаемого топлива и ветро-солнечной водородной энергии были изучены Е.М. до Сакраменто и др. [19]. Исследования показали, что в сценарии без введения водорода загрязнение в штате Сеара увеличится в 11 раз по сравнению с уровнем загрязнения в 2000 г. Введение водорода снизит коэффициент загрязнения примерно до 0,8 в 2055 г. в сценарии быстрого введения водорода. Качество жизни не улучшится и будет на уровне чуть ниже уровня 2000 г. в случае сценария отказа от введения водорода. Показатель качества жизни возрастет в 10 раз по сравнению с уровнем 2000 г. в случае сценариев быстрого и медленного введения водорода в энергетический баланс штата Сеара.

5. Заключение

Представленная в этой работе ветро-солнечная водородная энергетическая система показала результаты, которые демонстрируют преимущества введения водорода в энергетический баланс штата Сеара в качестве замены жидкому ископаемому топливу. Благодаря исключительным условиям солнечного излучения и ветрового потенциала в штате Сеара



водород может рассматриваться как экономически и экологически жизнеспособный энергоноситель.

Реализация такой системы будет способствовать диверсификации энергетической матрицы этого штата, создавая возможности для использования устойчивых источников энергии и избегая таким образом возможных ошибок, допущенных развитыми странами, экономика которых основана на ископаемом топливе. Штат Сеара значительно снизит энергетическую зависимость и превратится в экспортера энергии, что окажет положительное влияние на местную экономику.

Использование возобновляемых источников энергии в штате Сеара в результате позволит увеличить местный валовой внутренний продукт, снизить уровень загрязнения окружающей среды и, следовательно, повысить качество жизни населения данного штата.

Благодарности

Один из авторов (Л.С. де Лима) благодарит Бразильский национальный совет по научно-техническому развитию (CNPQ) за финансовую поддержку.

Acknowledgement

One of the authors (L.C. de Lima) thanks the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for financial support.

References

- [1] BENCE 2000—Balanc-o Energético do Estado do Ceará 2000. Coordenadoria de Energia e Comunicações da SEINFRA— Secretaria da Infra-Estrutura do Estado do Ceará, Fortaleza, CE; 2000. p. 103.
- [2] Winter C.J. Solar-hydrogen energy trade. *Energy Policy*, 1991;19(5):495–502.
- [3] Veziroglu T., Basar O.T. Dynamics of a universal hydrogen fuel system. In: THEME conference proceedings. New York: Plenum Press; 1975.
- [4] ElJrushi G.S., Veziroglu T. Solar-hydrogen energy system for Libya. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1990;15(12):885–94.
- [5] Lutfi N., Veziroglu T.N. A clean and permanent energy infrastructure for Pakistan: solar-hydrogen energy system. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1991;16(3):169–200.
- [6] Abdallah M.A.H., Asfour S.S., Veziroglu T.N. Solar-hydrogen energy system for Egypt. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1999;24:505–17.
- [7] Contreras A., Carpio J., Molero M., Veziroglu T.N. Solar-hydrogen: an energy system for sustainable development of Spain. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1999;24:1041–52.
- [8] de Lima L.C., Veziroglu T.N. Long-term environmental and socio-economic impact of a hydrogen energy program in Brazil. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2001;26:39–45.
- [9] Kazim A., Veziroglu T.N. Utilization of solar-hydrogen energy in the UAE to maintain its share in the world energy market for the 21st century. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2001;24:259–74.
- [10] Almogren S., Veziroglu T.N. Solar-hydrogen energy system for Saudi Arabia. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2004;29:1181–90.
- [11] Sacramento E.M. Um sistema de energia a hidrogenio solareólico para o estado do Ceará. Dissertação de Mestrado em Ciências Físicas Aplicada, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE; 2007.
- [12] International Energy Agency: World Energy Outlook 2002. Available on: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/weo2002.pdf>. Accessed on March 17.
- [13] Como Funcionam os Prec,os da Gasolina nos Estados Unidos. Available from: <http://hsw.uol.com.br/prec,os-da-gasolina.htm>; 2007. Accessed on February 08.
- [14] Dutton Dutton, A.G. A review of potential hydrogen production and delivery costs. Energy Research Unit, CLRC Rutherford Appleton Laboratory, May 2002. Available on: http://www.h2net.org.uk/PDFs/Systems/hydrogen_pres005_h2net.pdf. Accessed on April 12.
- [15] Consulting ICF. Protocolos para Medição e Geração de Dados relativos a Gases de Efeito Estufa. Available from: http://www.aracruz.com.br/doc/pdf/amb_mudancas_protocol_v1.pdf; 2005. Accessed on 16.05.07.
- [16] IPECE—Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Available on: <http://www.ipece.ce.gov.br>. Accessed on January 15, 2007.
- [17] Carvalho P.C.M., Pontes R.S.T., Oliveira Jr D.S., Riffel D.B., Oliveira R.G.V., Mesquita S.B. Estudo estatístico de radiação solar visando o projeto de unidades de dessalinização acionadas por painéis fotovoltaicos sem baterias. In: 5_ Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, Campinas, Brazil; October 2004.
- [18] Ruschmann Consultores. Análise da dinâmica social do estado do Ceará. 2002. Available on: http://www.bnb.gov.br/content/aplicacao/prodetur/downloads/docs/pdits_ce_vol_i_diagn_5_social.pdf. Accessed on December 12, 2006.
- [19] do Sacramento E.M., de Lima L.C., Oliveira C.J., Veziroglu T.N. A hydrogen energy system and prospects for reducing emissions of fossil fuels pollutants in the Ceará state – Brazil. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2008;33:2132–7.

