

Symposium

MOON 2020-2030

Noordwijk, 2015/Dec/16

# Solar Thermal Lunar Regolith Reduction for Oxygen Production

**Thorsten Denk**

Plataforma Solar de Almería - Ciemat

e-mail: [tdenk@psa.es](mailto:tdenk@psa.es)



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas



# Plataforma Solar de Almería – Ciemat



2



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

[tdenk@psa.es](mailto:tdenk@psa.es)



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

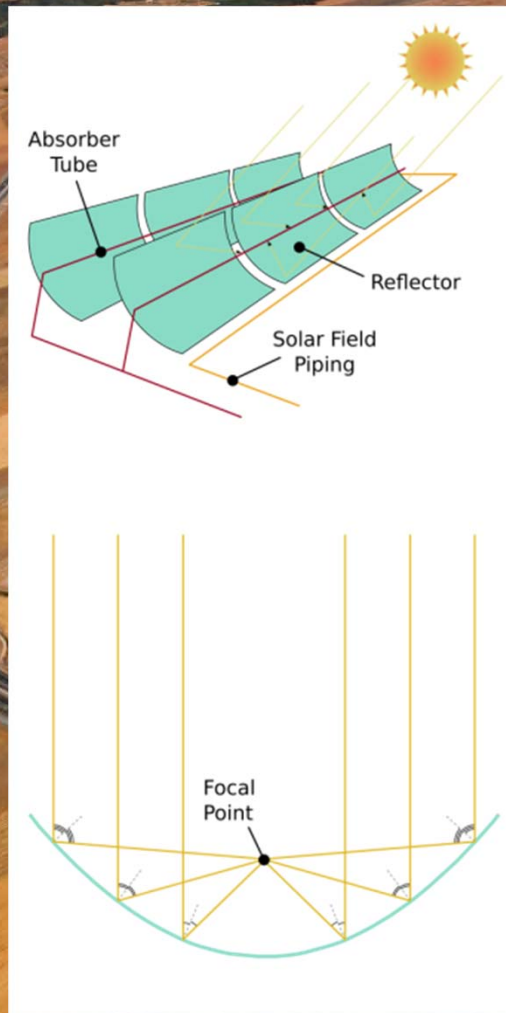
**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Concentrated Solar Power: Line Concentrating Systems – Parabolic Troughs



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

t Denk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

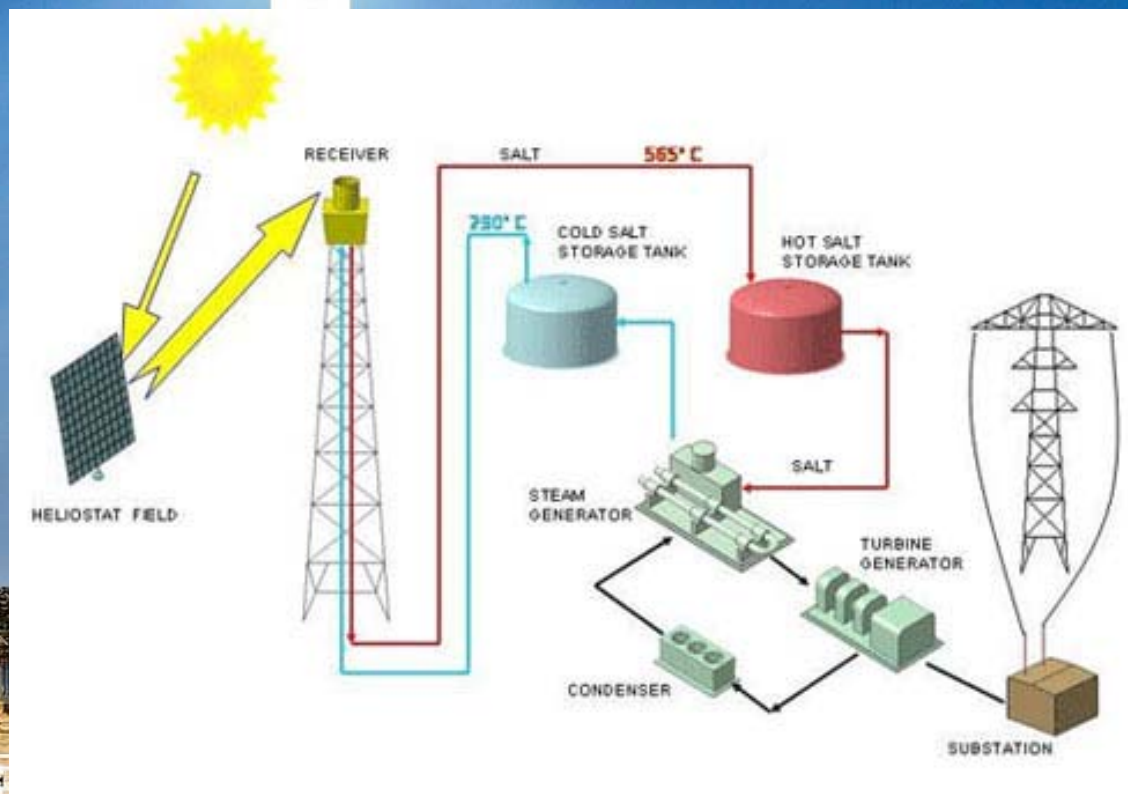
**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Concentrated Solar Power: Point Concentrating Systems – Solar Towers



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



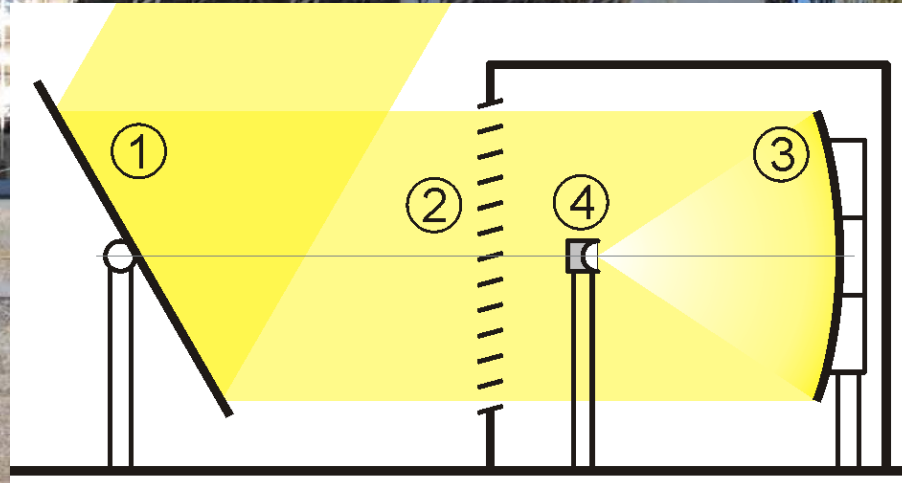
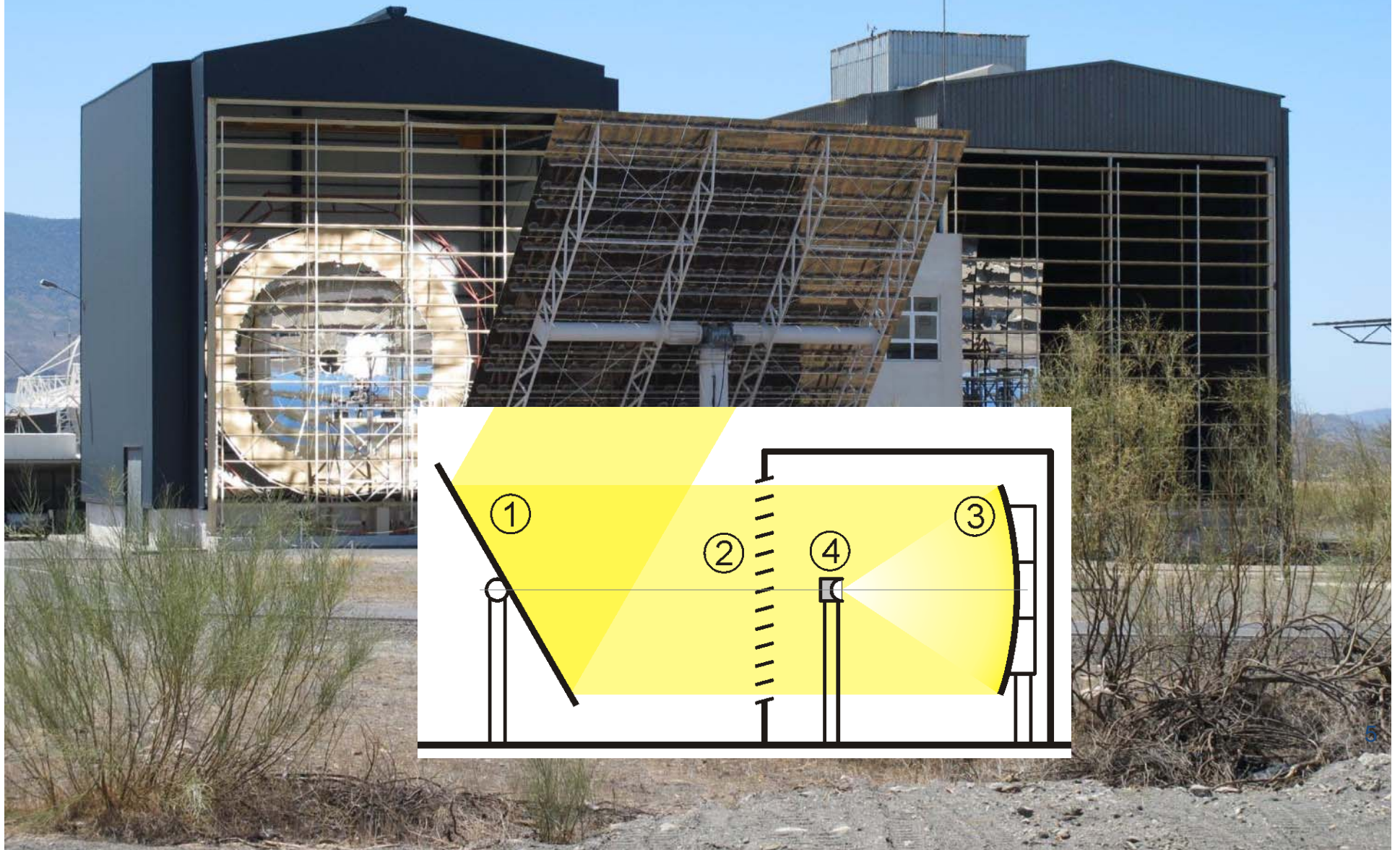
MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

# Concentrated Solar Power: Solar Furnace





# Oresol Project



6



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

[tdenk@psa.es](mailto:tdenk@psa.es)



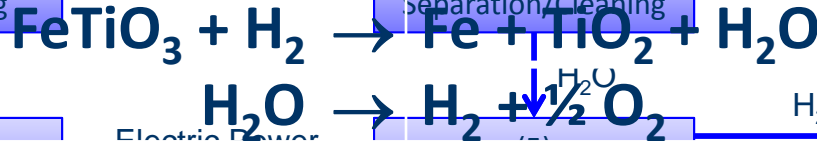
MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

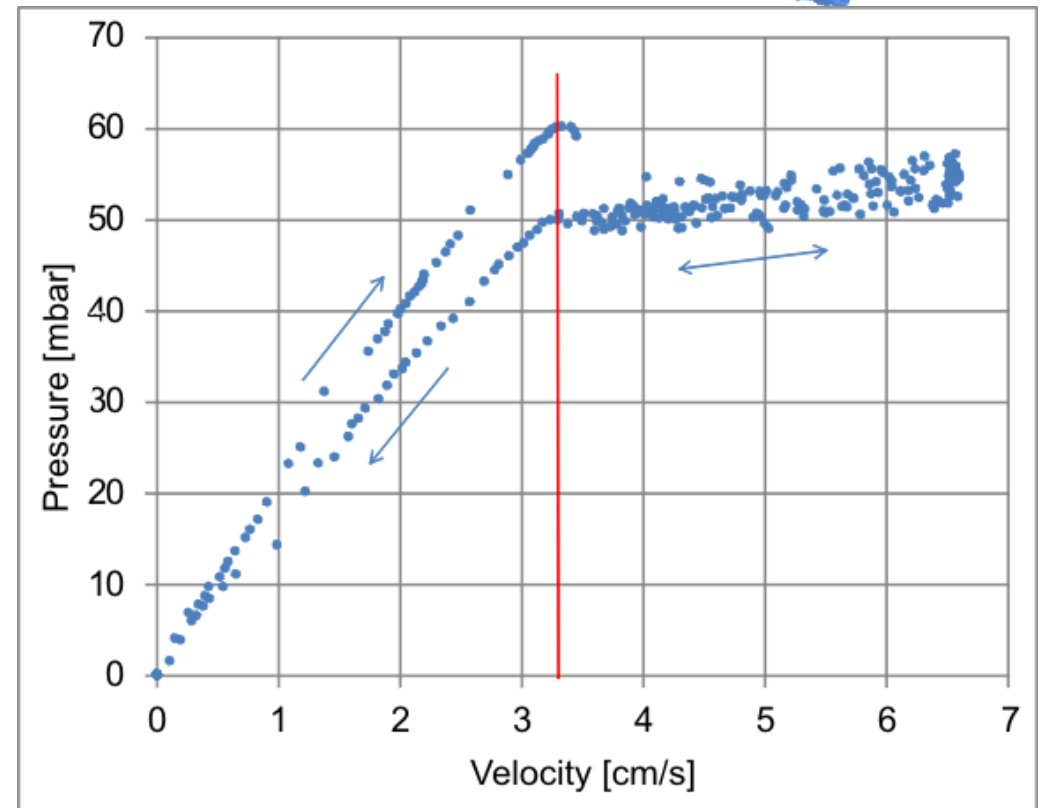
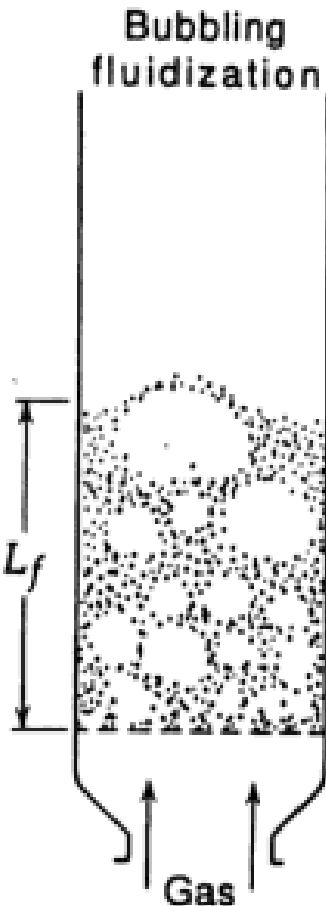
# Far Thermal Lunar Ilmenite Reduction



# Fluidized Beds – Minimum Fluidization Velocity



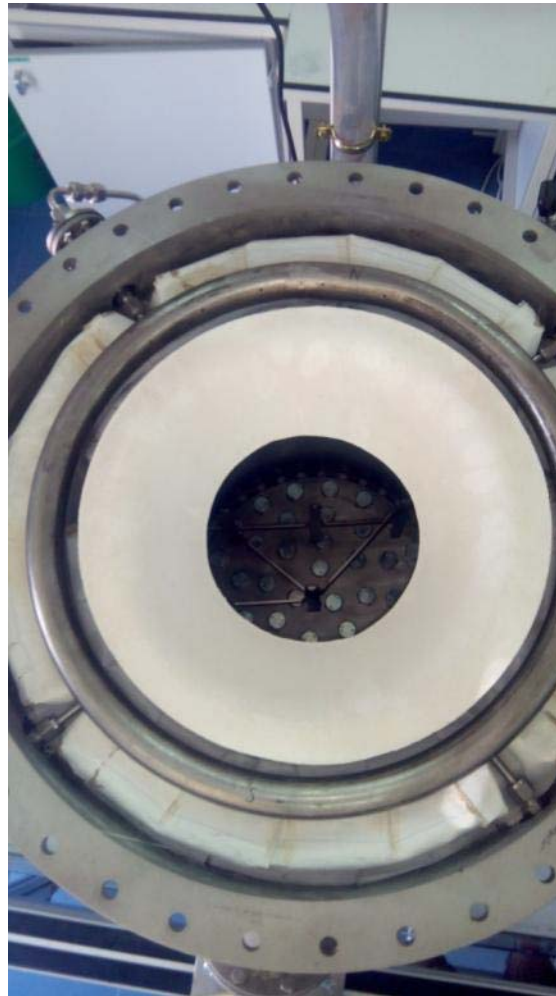
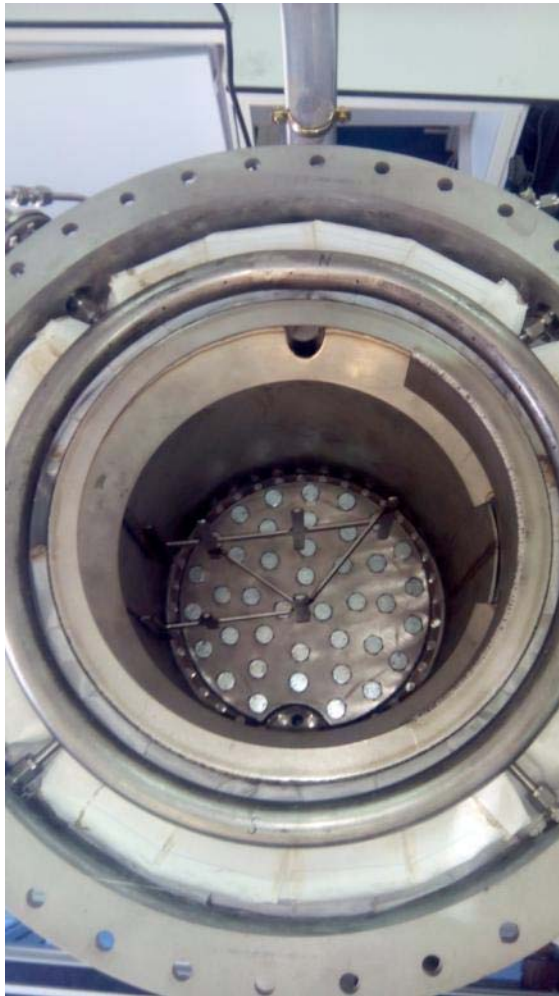
- Gas slip increases temperature.
- Gas (n) de Wi (!) ally
- Gas L<sub>f</sub> increases



$$\frac{\rho_s - \rho_g}{150\mu} g \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}}, \quad Re = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} < 20$$



# Oresol Hardware – Reactor





# Oresol Hardware – Particles Feed



10



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

t Denk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

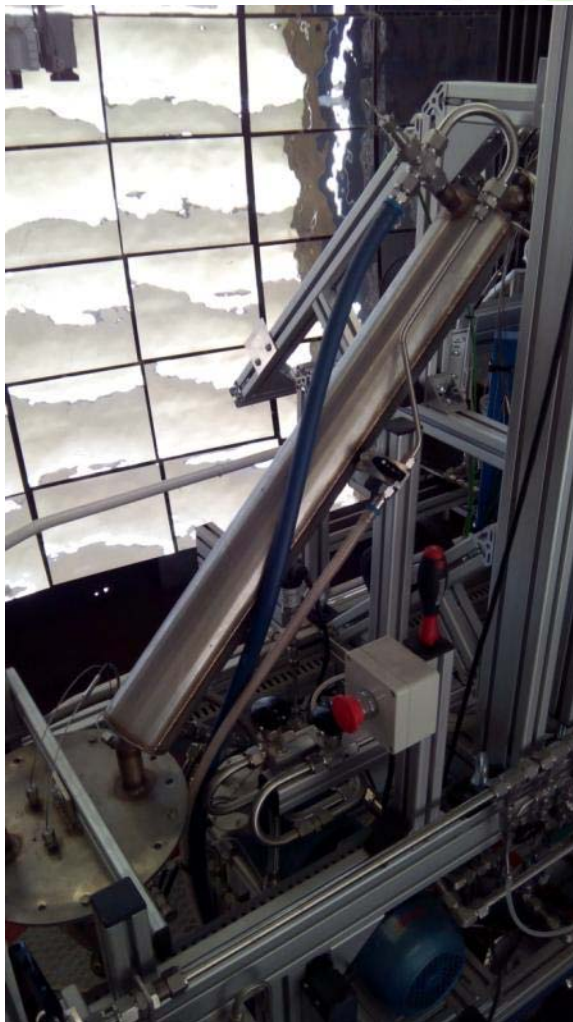
**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Oresol Hardware – Downstream



11



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es

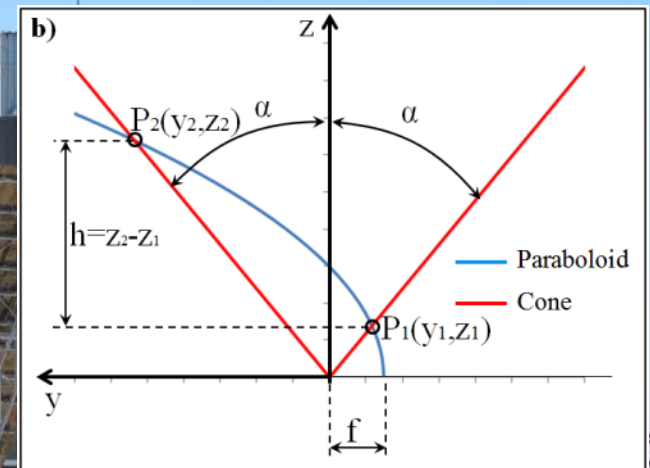
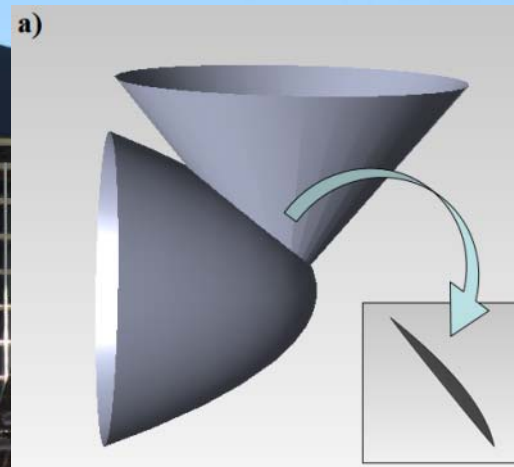
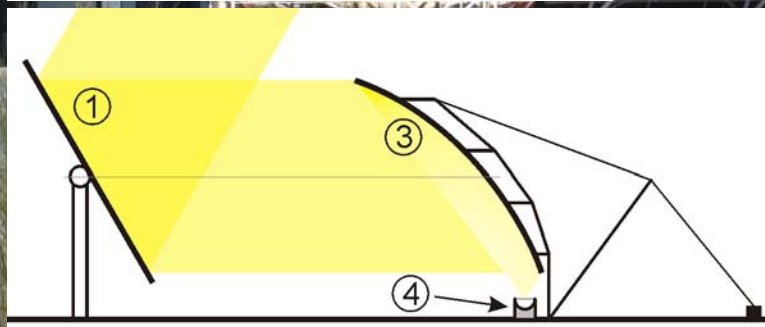
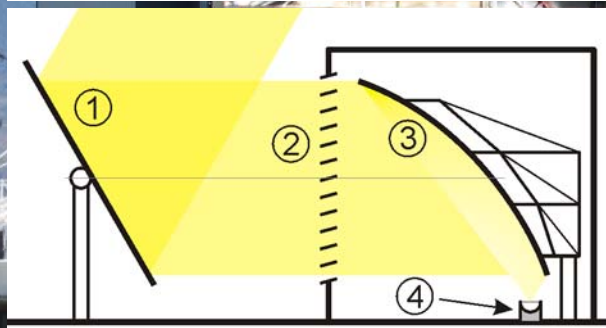
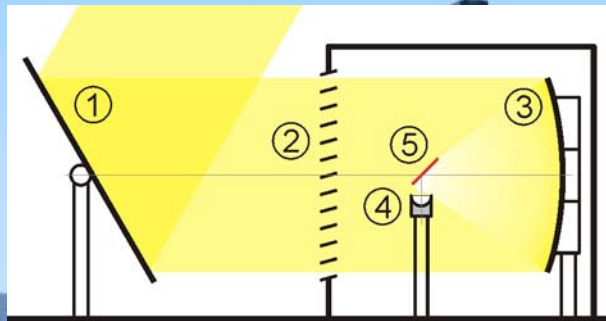


MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat** Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas  
PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Solar Concentrator – "Mussel"-Concentrator





# Oresol – Present Status



13



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

[tdenk@psa.es](mailto:tdenk@psa.es)



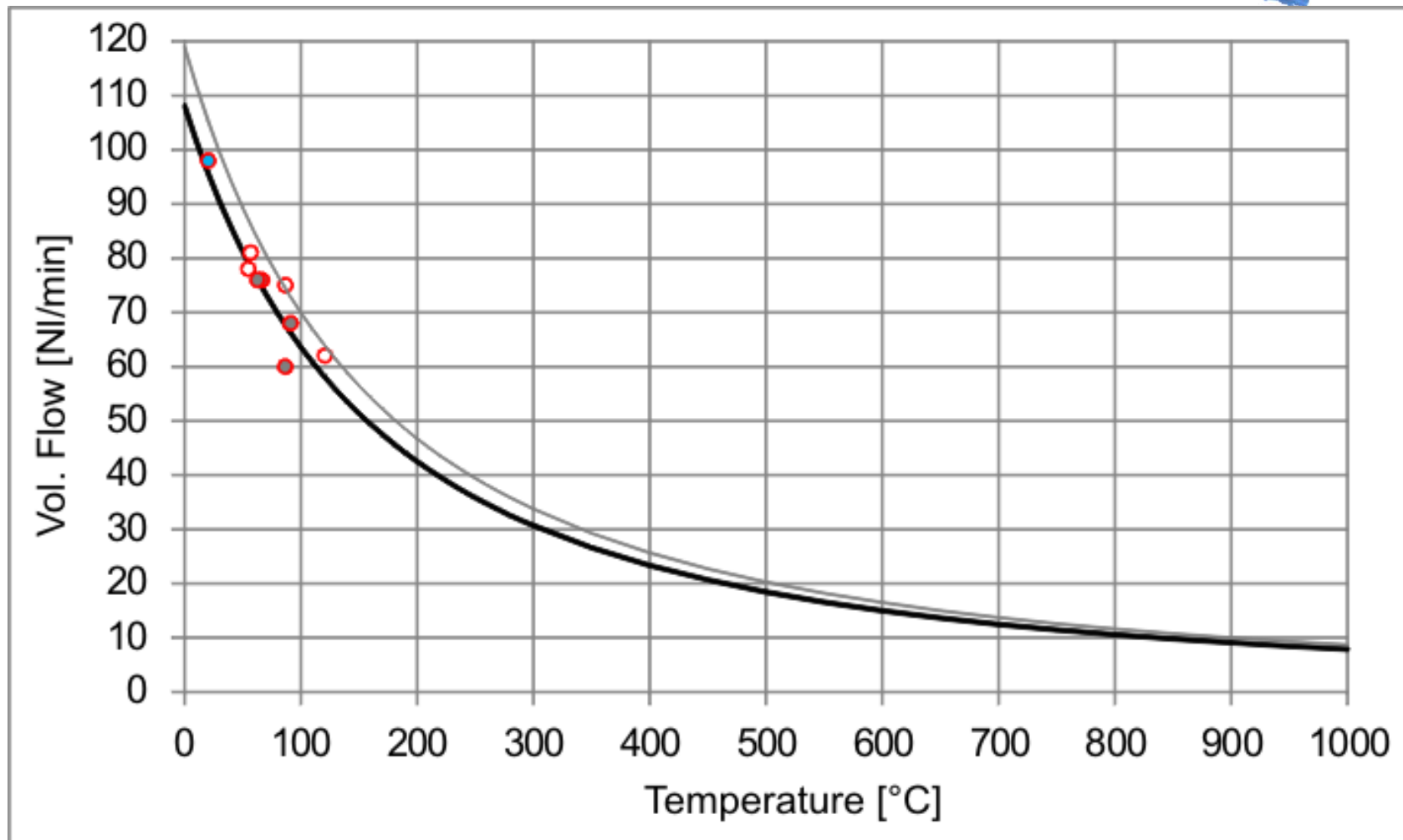
MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

# Oresol – First Results and Present Status



14



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

t Denk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



## Some Numbers...

- Ilmenite Content: 10% (after enrichment)
- Sulphur Content: 0.1%
- Hydrogen Excess: 5x
- => OutGas Comp: 79% $H_2$ , 20% $H_2O$ , 1% $H_2S$
- => net Oxygen: 0.63kg/h 2.8t/yr
- => Regolith: 1.1kg/min 290 t/yr
- Mining Depth: 50 cm
- Sieving/Enrichment Yield: 25%
- => Square of 30m x 30m /year
- => for 6-8 Astronauts (incl. night)
- => for 3 Apollo LM Ascent Stages / year

15



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



16



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

[tdenk@psa.es](mailto:tdenk@psa.es)



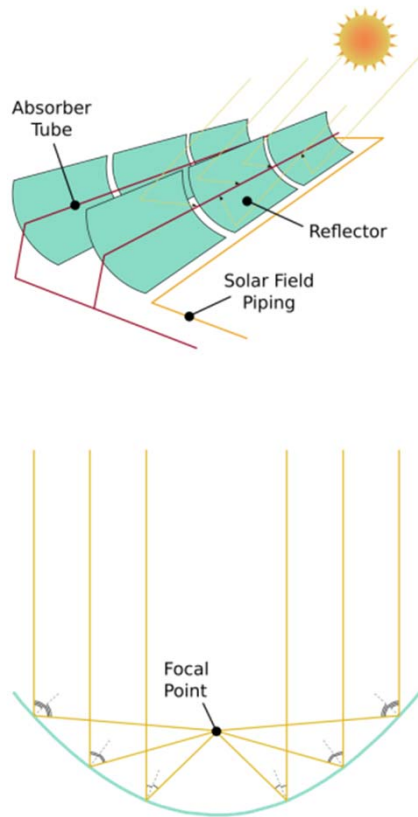
MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat** Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas  
PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

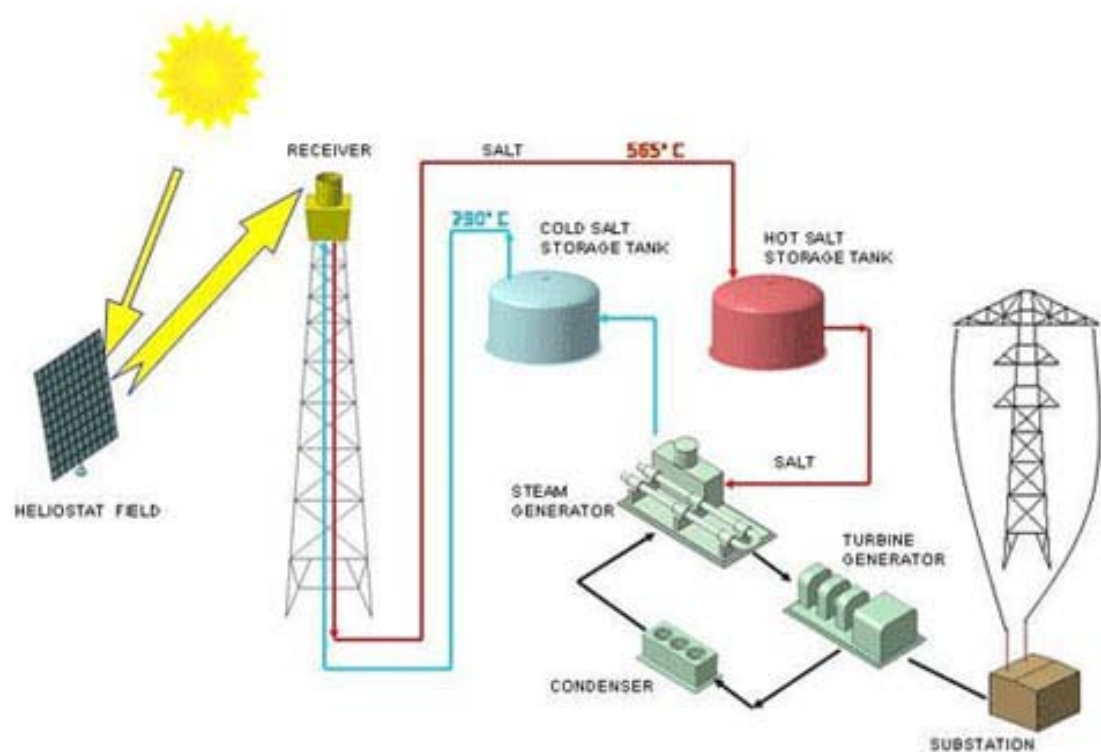


# Concentrated Solar Power: Concepts

## Line Focusing Systems: Parabolic Trough



## Point Focusing Systems: Solar Tower



17

# Lunar Oxygen Production Processes



**TABLE III**  
Qualitative Comparison of Lunar Oxygen Processes

Process	Tech-nology <sup>a</sup>	No. of Steps <sup>b</sup>	Process Conditions <sup>c</sup>	Feed-Stock <sup>d</sup>	Total	Rank
Ilmenite red. with H <sub>2</sub>	8	9	7	3	27	4
Glass red. with H <sub>2</sub>	7	9	7	6	29	2
Molten sil. electrol.	6	8	5	10	29	3
Vapor phase reduction	6	8	6	10	30	1

<sup>a</sup> Technology: 1 = major technologic development required; 10 = no major unknowns.

<sup>b</sup> No. of steps: 1 = many (>5); 10 = one step.

<sup>c</sup> Process conditions (temperature, energy, plant mass, corrosion): 1 = severe; 10 = low.

<sup>d</sup> Feedstock requirements: 1 = huge quantities; 2 = mare, beneficiated (ilm); 5 = mare, unbeneficiated; 10 = any feedstock, unbeneficiated.

It must be thoroughly appreciated that there is considerable subjectivity in these rankings, and even that the four different factors themselves are not really of identical importance.



Source: Taylor, Carrier: *Oxygen Production on the Moon: An Overview and Evaluation*. Univ. of Arizona Press; 1993.

18



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

t Denk@psa.es

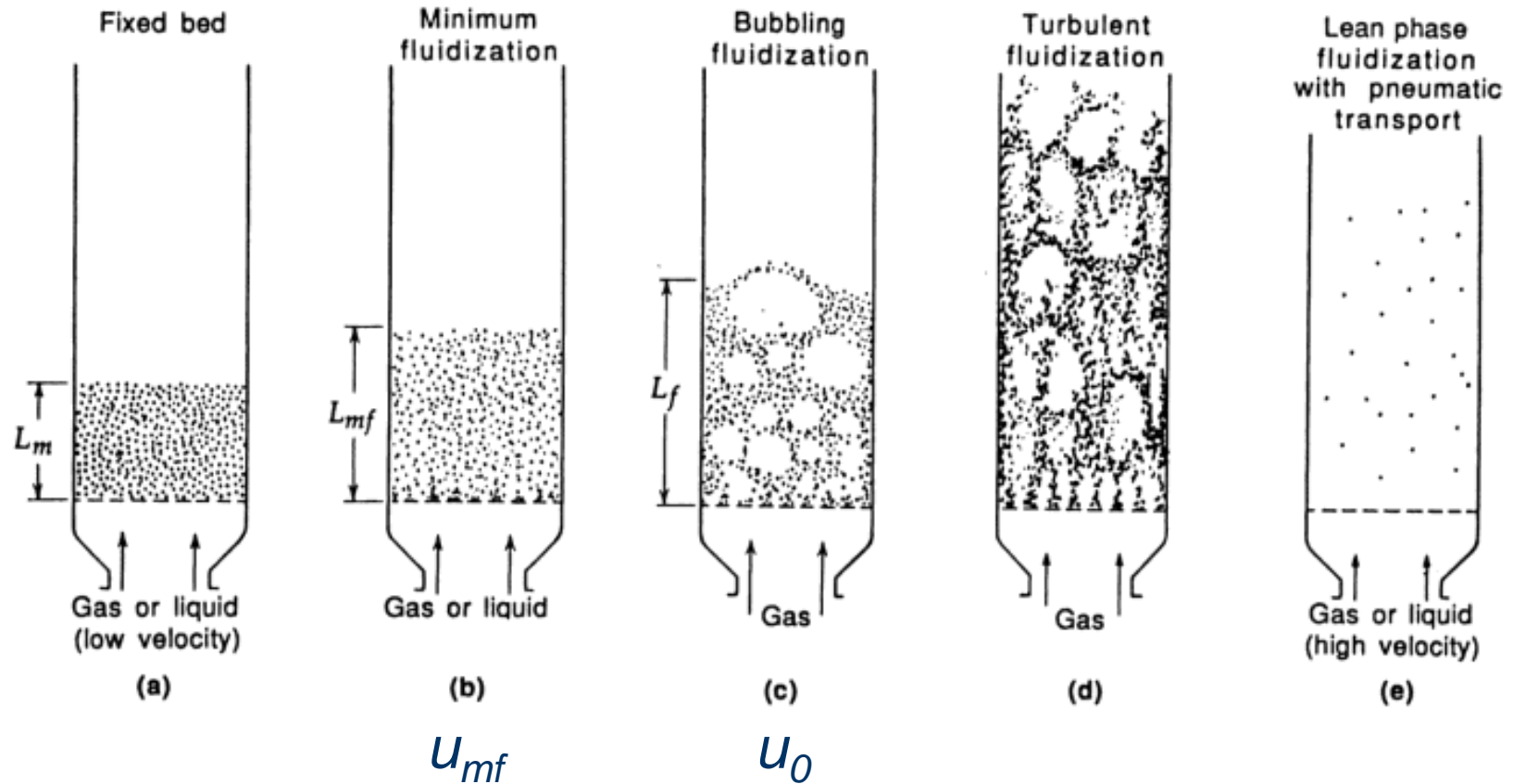


MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat** Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas  
PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Fluidized Beds



Source: Kunii, Levenspiel: *Fluidization Engineering*. Butterworth Heinemann, Boston, 1991.

19



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

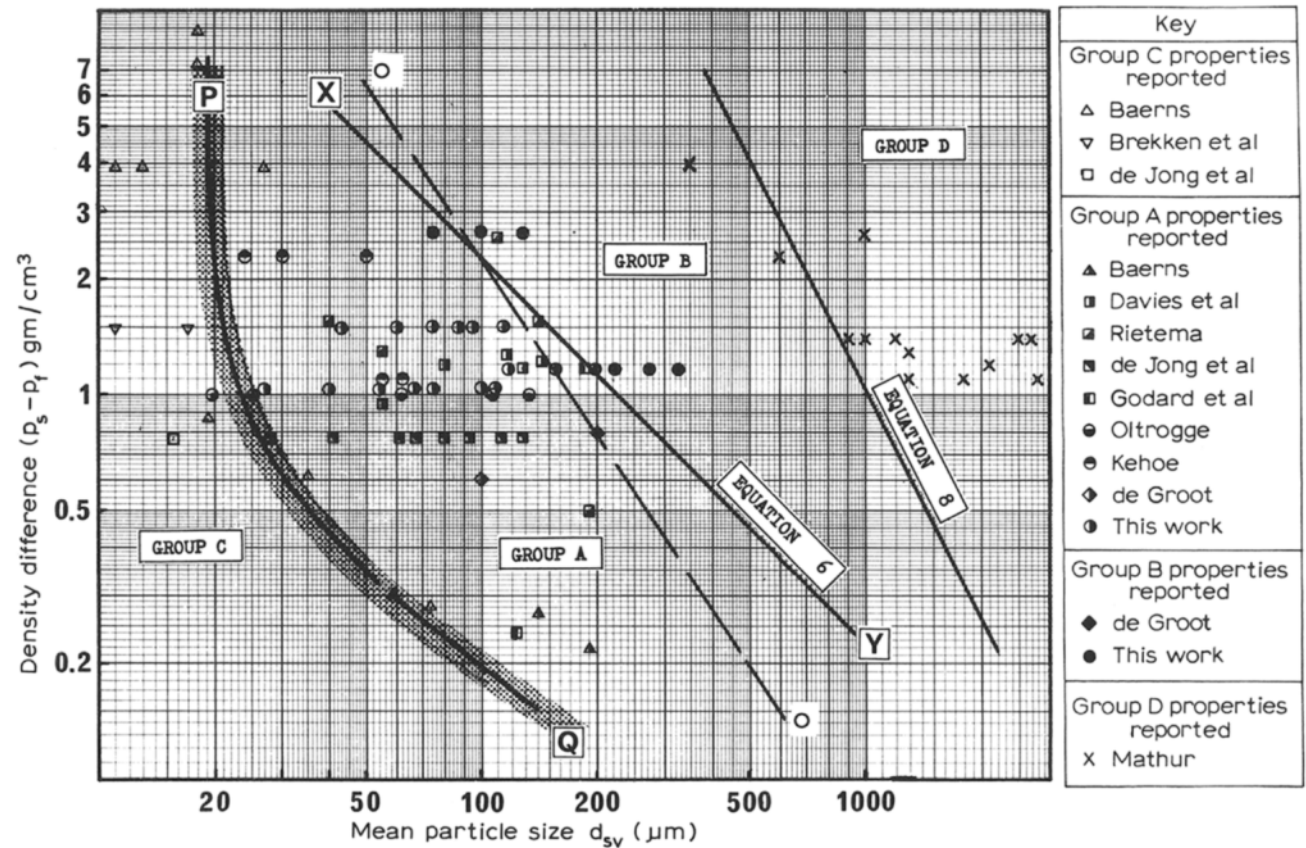
**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

# Geldart Classification of Particles

- A: aeratable (small)
- B: bubbling (sandlike)
- C: cohesive (very fine)
- D: dense/large (spoutable)



Source: Derek Geldart: *Types of Gas Fluidization*. Powder Technology, 7 (1973) 285-292

20



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

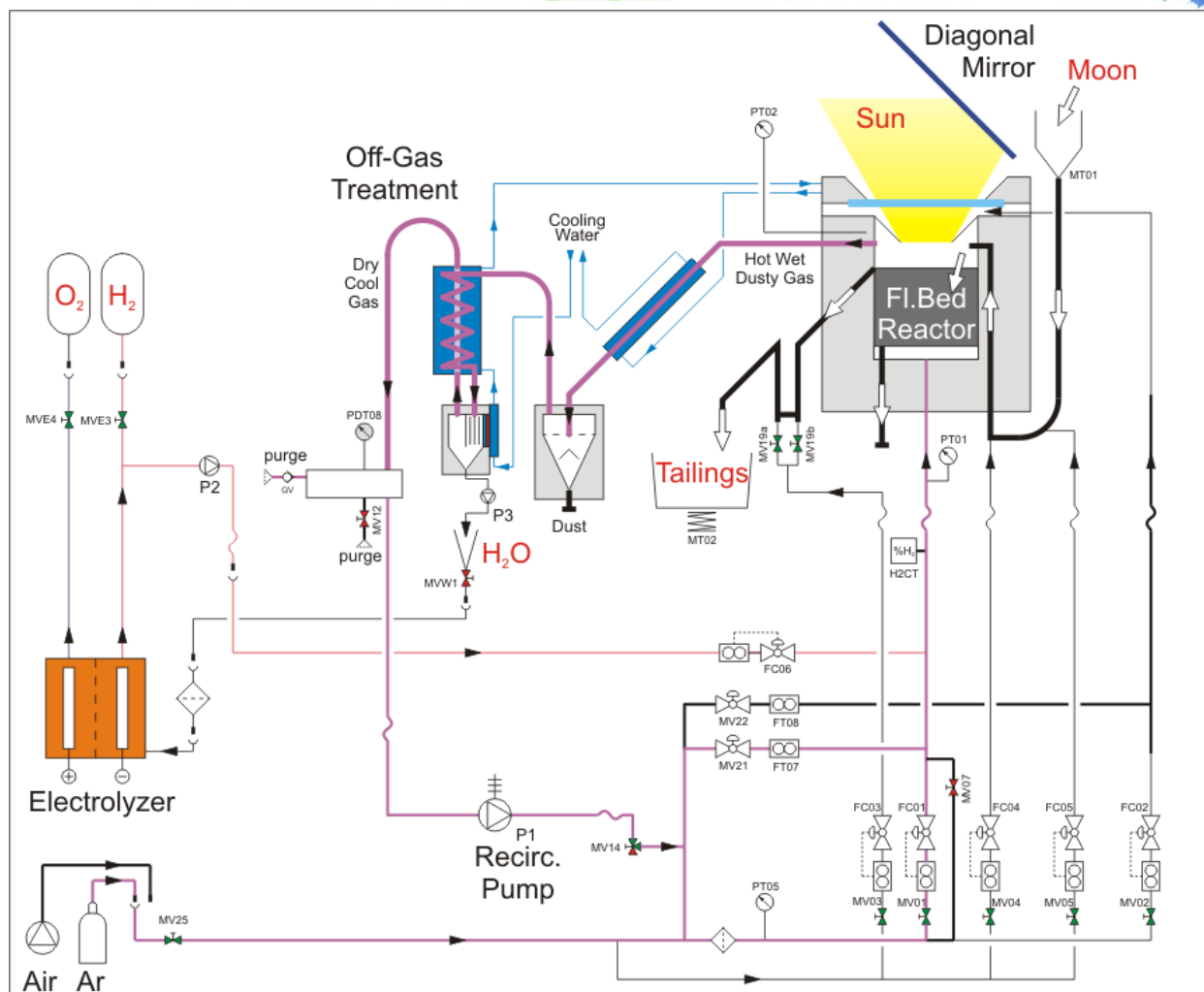
**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

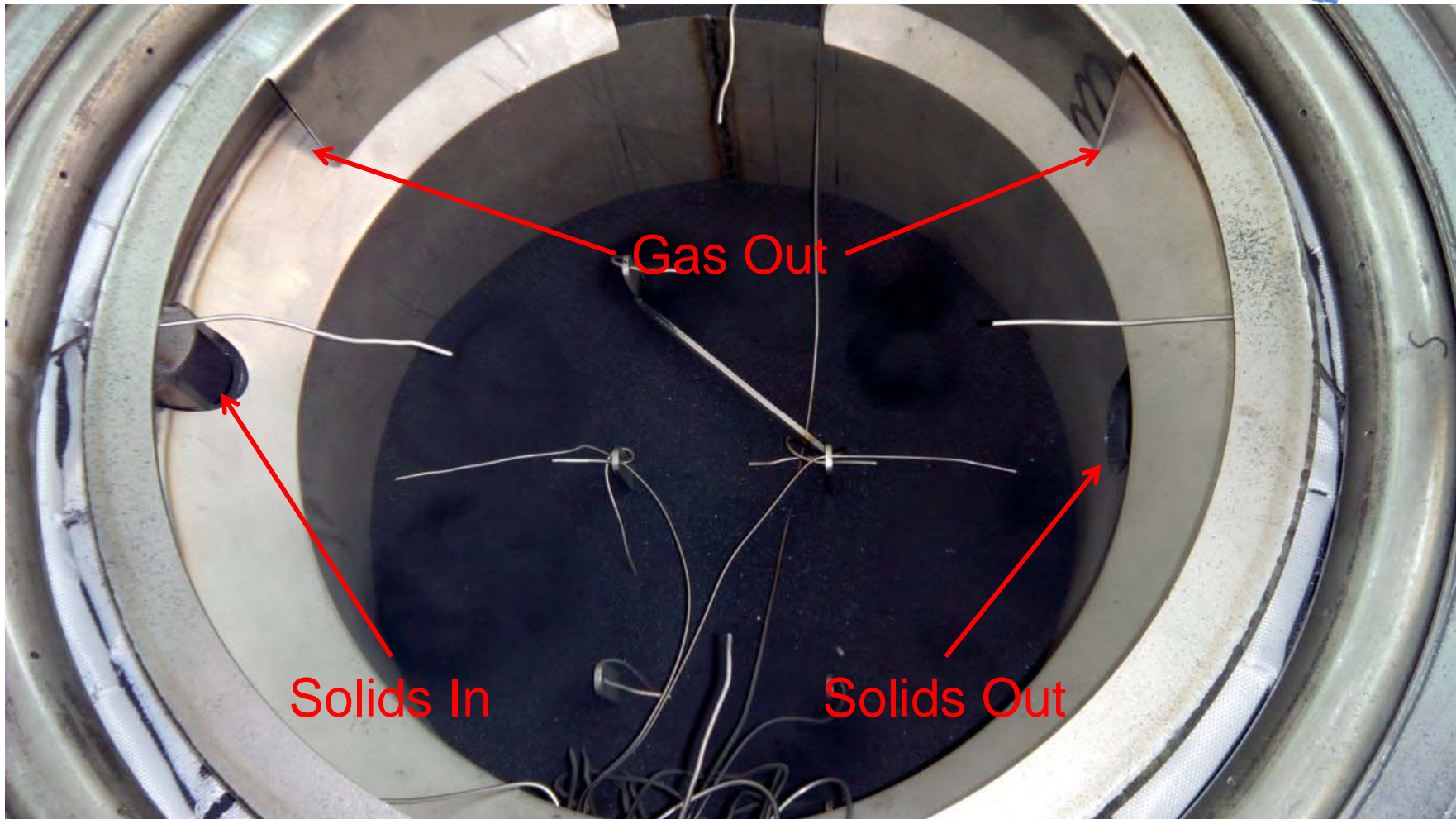


# Oresol Process Scheme



21

# Oresol Hardware – Reactor



22



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Oresol Hardware – Particles Removal



Solids Out

Gas Out

Gas In

Solids In



23



# Oresol Hardware – Particles Removal



24



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

t Denk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

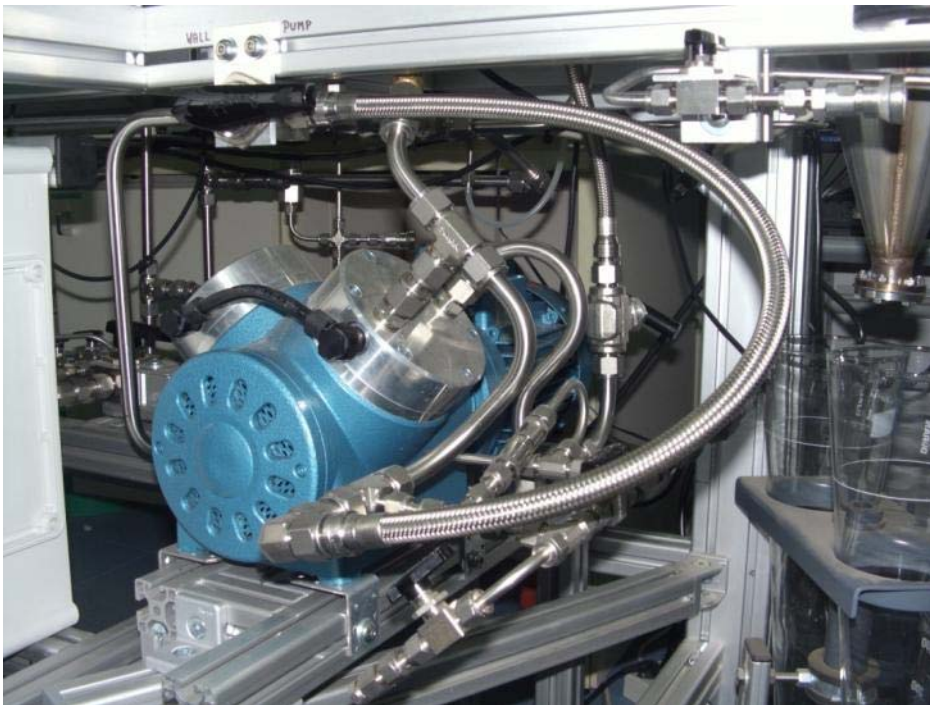
**Cimat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

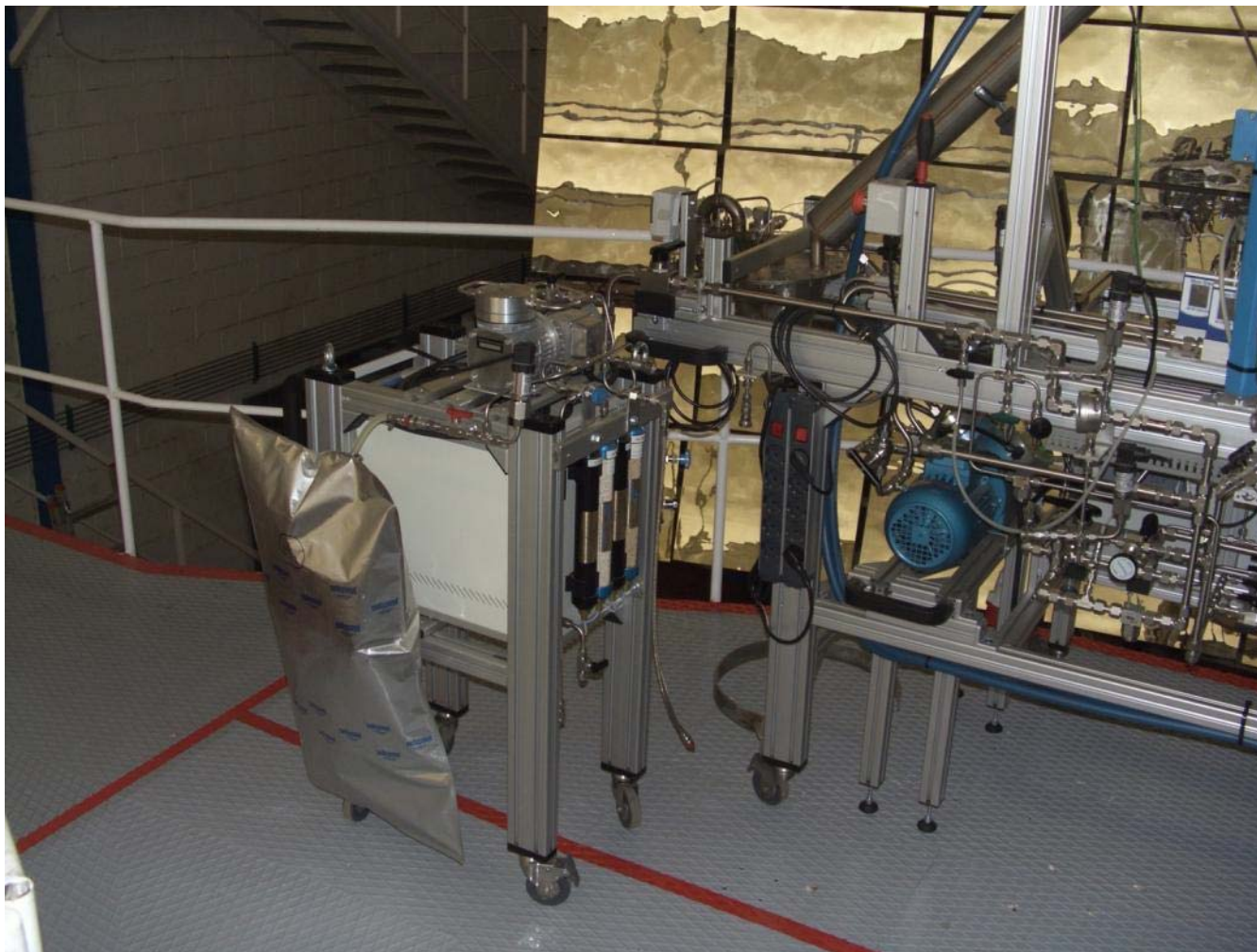


# Oresol Hardware – Recirculation & Upstream





# Oresol Hardware – Electrolyzer



26



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

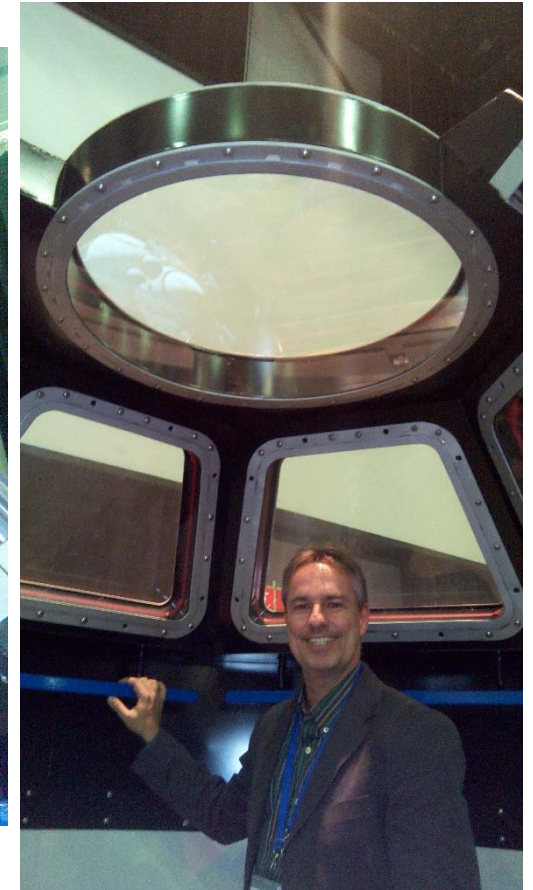
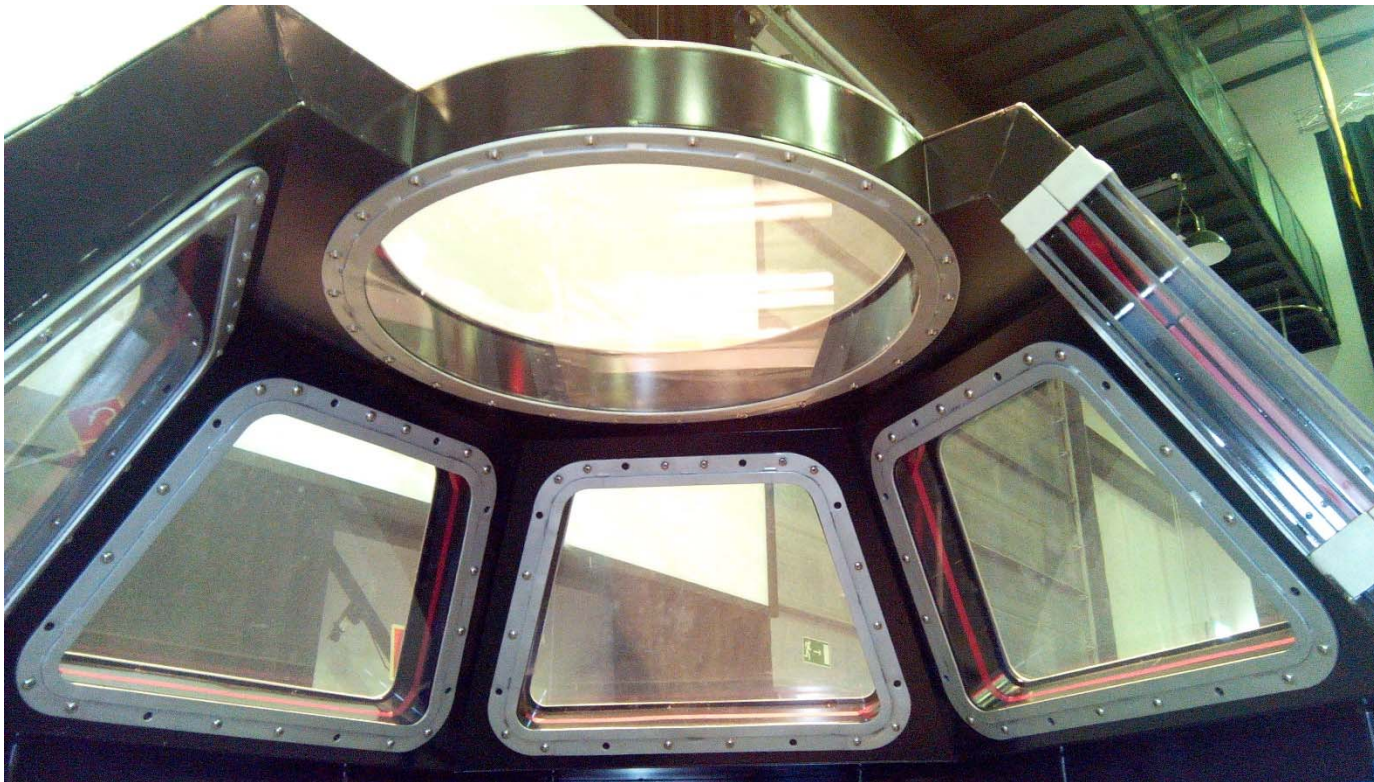
**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Window for Lunar Vacuum



27



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat** Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas  
PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Solar Concentrator (Heliostat)



Lightsail – A (The Planetary Society)

28



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

t Denk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Cimat** Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas  
PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA





# Regolith Excavation & Pre-Processing



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

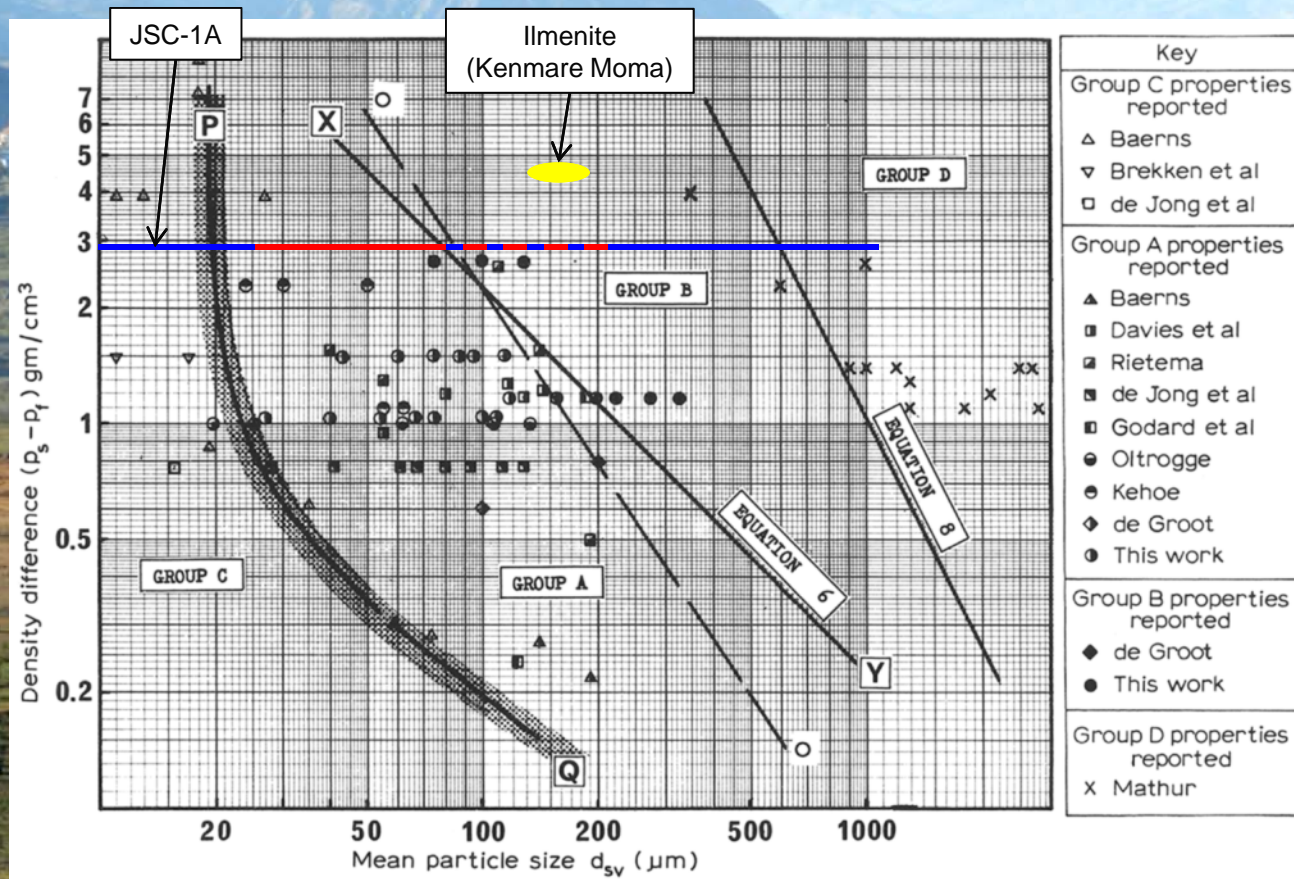
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA



# Regolith Excavation & Pre-Processing

## Screening



30



MOON 2020-2030, Noordwijk, 2015/Dec/16  
Thorsten Denk, Plataforma Solar de Almería

tdenk@psa.es



MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**

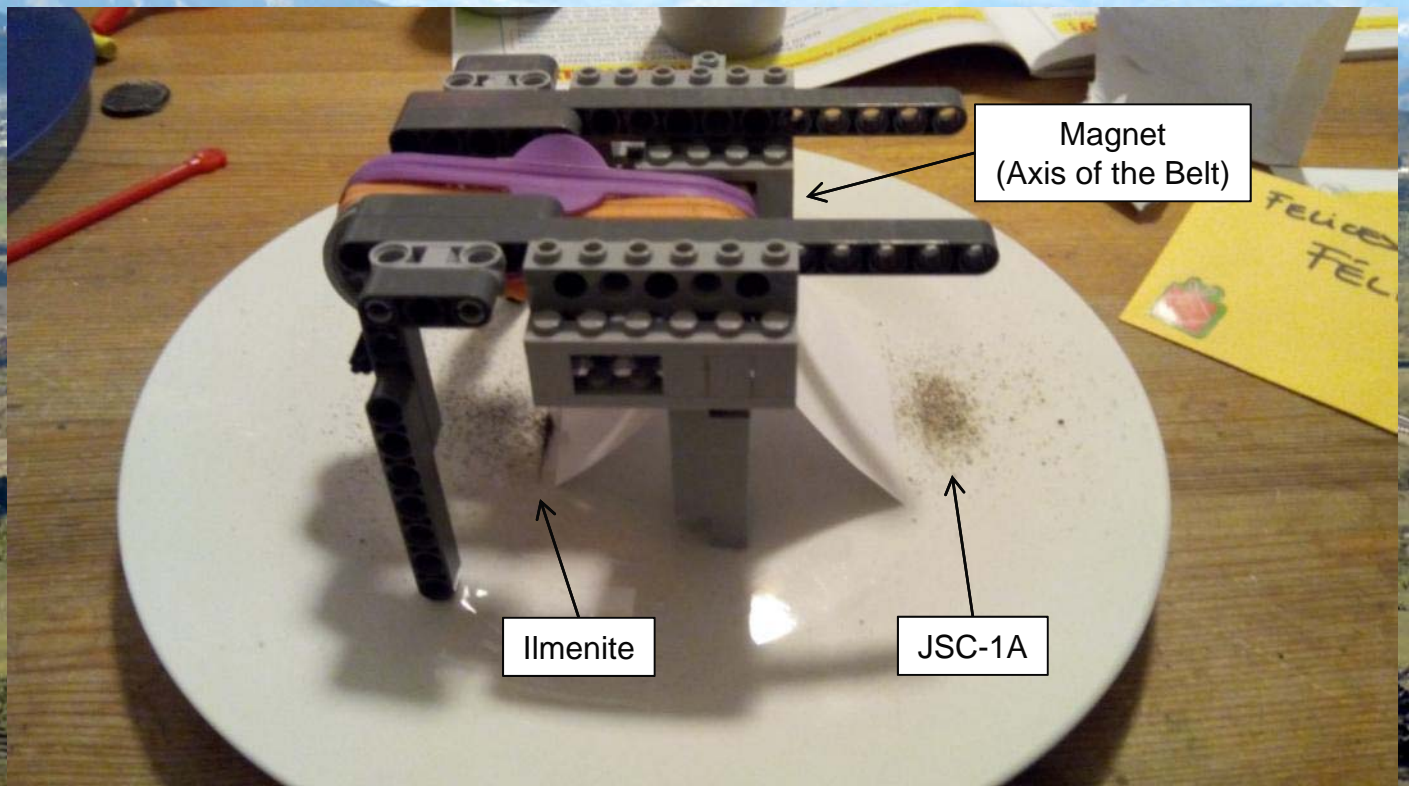
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas

PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA

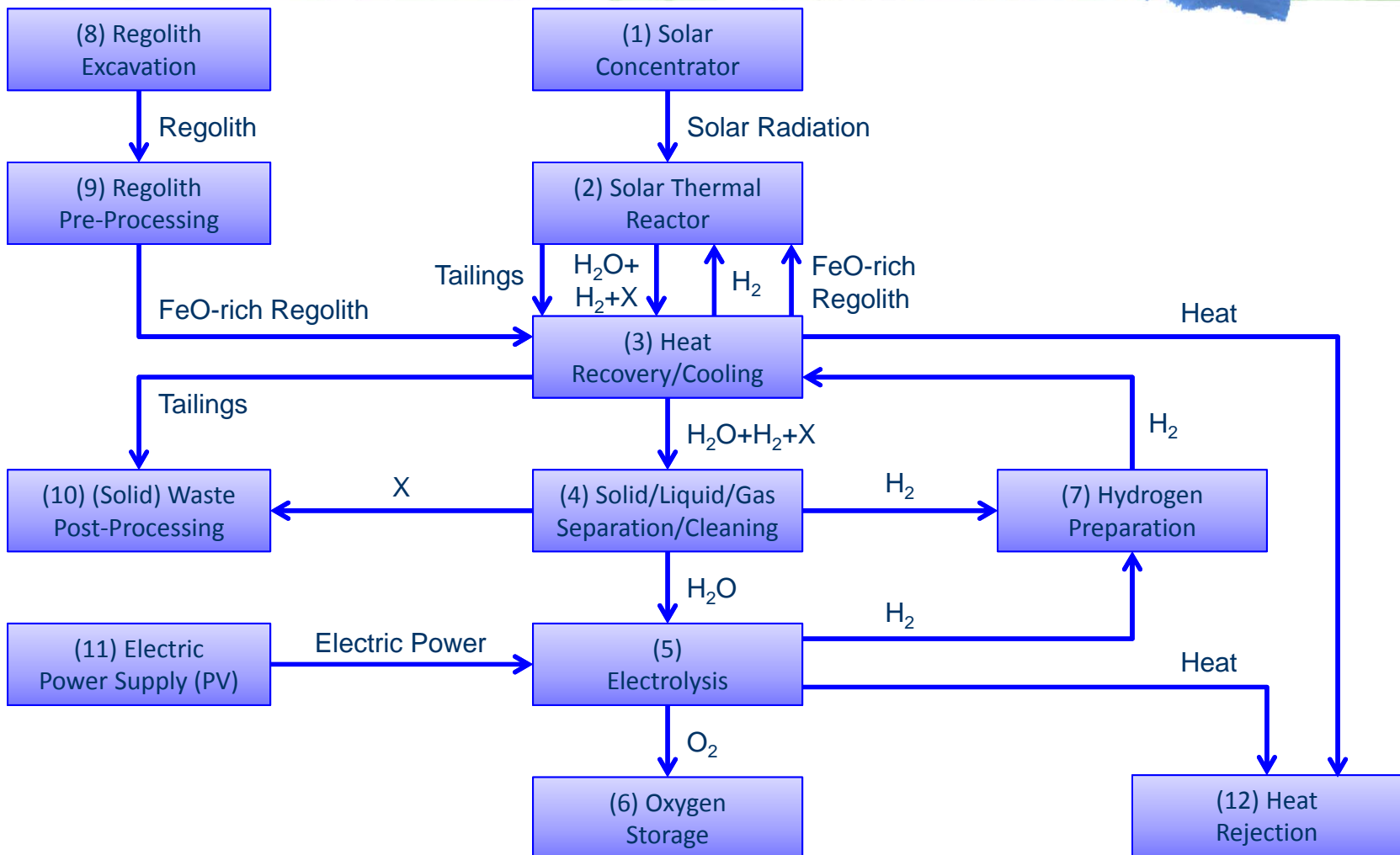


# Regolith Excavation & Pre-Processing

## Enrichment



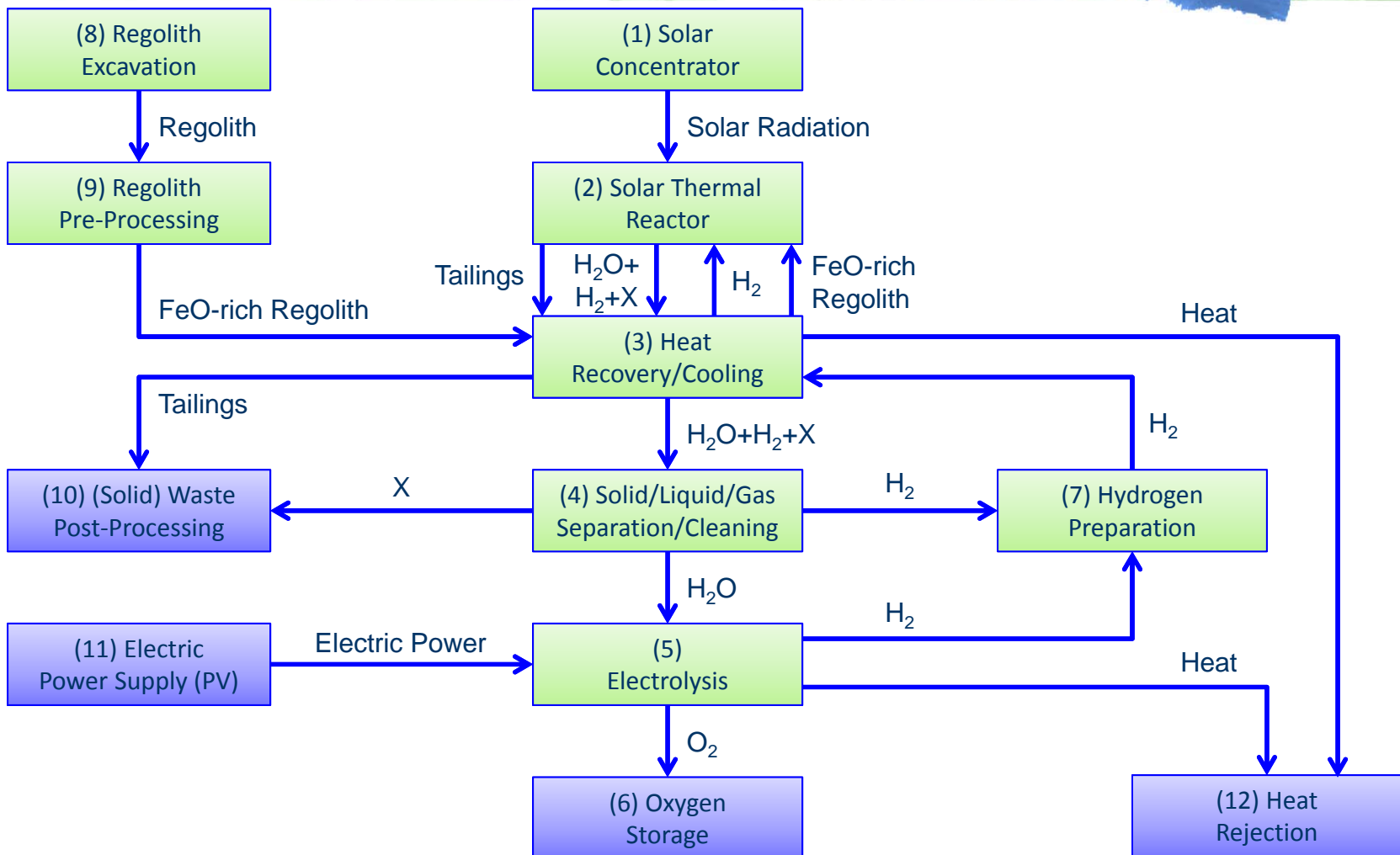
# Solar Thermal Lunar Ilmenite Reduction



32



# Solar Thermal Lunar Ilmenite Reduction



33