



Brazília: élenjáró a villamos energetikában is? - avagy egy óriás energiaéhsége

Az Energetikai Szakkollégium Schenek István emlékfélévének ötödik előadására 2015. április 16-án került sor, ahol az érdeklődők részletesen megismerhették Brazília energiaiparát, kitérve a legfontosabb vízerőművekre, a nukleáris energiaiparra, illetve a szél- és napenergia felhasználásra.

Előadónk Kimpián Aladár, a BME VIK tiszteleti oktatója volt.

Brazília gazdasága

Brazília nem véletlenül került be a világ gazdaságilag vezető országai közé, hiszen gazdaságának nem csak mérete, de fejlődésének üteme is jóval meghaladja a világtátlagot. A 2013 évi CIA World Factbook alapján GDP-je 2190 milliárd USD, amellyel így a 7. helyen áll az országok között. Gazdaságát előrelendítette a 2014-es labdarúgó világbajnokság, amit a 2016-os Rio de Janeiro-i olimpia fog a későbbiekben fokozni.

A dinamikus és sokszínű gazdaságának 40%-át az ipar, 10%-át a mezőgazdaság, 50%-át a szolgáltatások adják. A brazil gazdaság adja a teljes latin-amerikai termelés kerekén 40%-át. Brazília alapító tagja az 1991-ben létrehozott Dél-Amerikai Közös Piacnak (a Mercosur-nak), melynek tagja még Argentína, Paraguay és Uruguay, társult tagja Bolívia és Chile. Az ország a világ legnagyobb kávé-, cukornád-, narancs- és banántermelője, és második a szója-, kakaó- és marhahús-termelésben. Brazília fő ásványkincsei: vas-, króm-, mangán-, ón-, cink- és uránérc, bauxit, foszfát, kőszén, kősó, arany, gyémánt. Az utóbbi évtizedek legdinamikusabban fejlődő iparágai a jármű-, a petrokémiai és a hadiipar. Brazília a világ legnagyobb fegyvergyártóinak és kereskedőinek egyike. A legfontosabb ipari és kereskedelmi központ São Paulo.

Brazília a világ 10. legnagyobb energiaszolgáltatója, fontos földgáz- és kőolajtermelő és a 2. legnagyobb etanolüzemanyag-termelő.

Víz	becsült potenciál: 3000 TWh/év gazdaságosan kihasználható: 800 TWh/év (a 2011. évi termelés kb. 400 TWh)
Kőolaj	5-8 milliárd hordó (0,8-1,3 milliárd m ³) főleg off-shore
Földgáz	feltárt tartalék: kb. 300 milliárd m ³ becsült: ennek 15-szöröse
Szén	kb. 30 milliárd t
Uránérc	160 000 t, a kitermelés 1500-2000 t/év

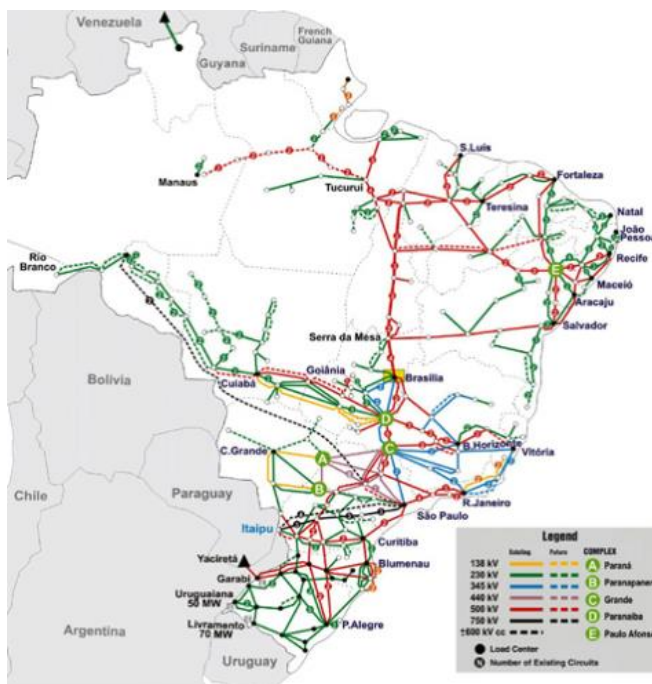
1. ábra: Brazília feltárt, illetve becsült energiahordozó-tartalékai

Nagy- és igen nagy feszültségű átviteli hálózat

Névleges feszültség [kV]	Hossz [km]
750	2 698
500	15 860
345	6 220
230	25 375
±600 DC	1 625
Összesen	51 778

2. ábra: Távvezetékek nyomvonalhossza

Az ország legiparosodottabb régiójának, São Paulónak és környékének ellátása szempontjából kiemelkedő szerepe van a 3 db egyrendszerű, kb. 900 km nyomvonalhosszúságú Itaipu Brazil-Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto (São Paulo) 750 kV-os távvezetéknek, valamint a 2 db egyrendszerű, 818 és 807 km nyomvonalhosszúságú Itaipu Brazil-Ibiúna (São Paulo) ±600 kV-os egyenáramú távvezetéknek.



3. ábra: Brazília átviteli hálózata 2010-ben

Vízenergia potenciál

A villamos energia több mint 2/3-át a vízerőművek termelik. Ezek közül is kiemelkedik a világ második legnagyobb kapacitású erőműve, a Brazília és Paraguay által a bővizű Paraná folyón közösen létesített és üzemeltetett 14000 MW-os Itaipu Binacional.

A brazil vízerő-tartalékok jelentős része a 9 ország (többek között Brazília, Peru, Kolumbia) földjén tenyésző 5,5 millió km²-es, legalább 55 millió éves amazóniai esőerdő területén van. A Földön itt a legnagyobb a biodiverzitás: 2,5 millió rovarfaj, több ezer növényfaj, 2000 madár-, hal- és emlősfaj létét feltételezik. Az esőerdő azonban fogy: évente ~20 000 km²-t irtanak ki a legeltető szarvasmarhatartás és a szójatermesztés kedvéért. Ehhez képest a tározó nélküli folyami vízerőművek kisebb erdőkárral járnak.

Név	Hossz [km]	Vízgyűjtő terület [km ²]	Átlagos vízhozam [m ³ /s]	Betorkollás
Amazonas	6400	6 915 000	219 000	Atlanti-óceán
Paraná	4880	2 583 000	18 000	Atlanti-óceán
Tocantins	3650	950 000	14 000	Atlanti-óceán
Madeira	3380	1 485 000	31 000	Amazonas
Purus	3211	63 000	8 000	Amazonas
São Francisco	3180	610 000	3 000	Atlanti-óceán
Duna	2888	817 000	7 000	Fekete-tenger

4. ábra: Brazília legnagyobb folyói (Duna összehasonlításképp)

Az Itaipu vízerőmű

A brazil-paraguayi-argentín hármashatártól 20 km-re, a bővizű Paraná folyón épült az évekig világelső (most második), $2 \times 10 \times 700 = 14\,000$ MW-os Itaipu vízerőmű. (Guarani indián nyelven: Itaipu = a zengő kő.) Az erőmű jobb parti paraguay-i oldala 50 Hz-es, míg bal parti brazil része 60 Hz-en termel évente 100 TWh villamos energiát. Az erőműhez egy 1350



5. ábra: Az Itaipu vízerőmű

km²-es tározó tartozik, gátjának koronamagassága 196 m és a maximális áteresztő képessége 62 200 m³/s, lejtős árapasztója pedig 500 m hosszú.

Az erőműben 700 MW-os Francis-turbinák találhatók, melyek víznyelése 700 m³/s, ejtőcsöveinek átmérője pedig 10 méter. Mind a 10 db paraguayi, 700 MW-os, 50 Hz-es, mind a 10 db brazil, ugyancsak 700 MW-os, 60 Hz-es generátor 18/550 kV áttételű, fázisegységes blokktranszformátorokon keresztül csatlakozik a gát gépházában lévő 550 kV-os kénhexafluorid szigetelésű kapcsoló berendezéshez.

A 700 MW-os generátorok blokktranszformátorai a brazil WEG Transformadores gyárban készültek, amelyet 1961-ben alapítottak. A 200 tonnás egyfázisú egység adatai a brazil (balparti) oldalon: 256 MVA, 18/550 kV, 60 Hz, a paraguayi (jobb-parti) oldalon 275 MVA, 18/550 kV, 50 Hz. Mivel az 550 kV-os kapcsoló berendezések nagyon gyors



6. ábra: 500 kV-os kivezetések sodronyai

tranzienseket (VFT-eket) keltő SF₆ szigetelésűek, a világon először e transzformátorokon is elvégezték a VFT próbát, amely szigorúbb, mint a 250/2500 µs-os kapcsolási hullámú vizsgálat.

A paraguayi erőműrésztől induló 4 db 500 kV-os egyrendszerű távvezeték közül 2 db becsatlakozik a 2 km-re lévő Itaipu Paraguay 500/220 kV-os, 50 Hz-es alállomásba, majd tovább halad az Itaipu Brazil alállomásig, a másik két távvezeték egyenesen az Itaipu Brazil alállomásba fut be, és szállítja Brazília felé a paraguayi erőműrész teljesítményének azt a részét, amelyre a paraguayi villamosenergia-rendszernek nincs szüksége.

A brazil erőműrésztől induló 4 db 500 kV-os egyrendszerű távvezeték csatlakozik a 11 km-re lévő Itaipu Brazil alállomás 500/750 kV-os kapcsoló berendezéséhez, mely az Ivaiporã és Itaberá alállomásokon keresztül 3 db egyrendszerű, kb. 900 km nyomvonal-hosszúságú 750 kV-os távvezeték indít a São Paulo melletti Tijuco Preto 750/500/345 kV-os alállomáshoz.



7. ábra: 750kV-os távvezeték, "nabla" tartóoszloppal

Mindkét oldalon a 4-4 db induló távvezeték négyes kötegű fázisvezetővel van ellátva és termikus terhelhetősége kb. 2000 MW.

Brazília kisebb vízerőművei

Amazonas mellékfolyóján, a bővizű Rio Tokantins-on épült a 23 gépes, 8370 MW-os **Tucuruí** vízerőmű.

A Tucuruí-tól Manaus-ig menő 500 kV-os távvezeték keresztezi a 2030 m széles Amazonast. Ezt 290 m magas távvezeték tartó oszlopokkal valósították meg. Az oszlopok acélcsövekből épülnek fel, feszítőoszlopaik rendszerenként egytörzsűek. A vezetékek vízszint feletti szabadmagassága 72 m. A négyes kötegű áramvezetőt négyes szigetelőláncok tartják. A főszárak és a rácsrudak csavaros kötésű, karimás csőszakaszok. A toronyba lifttel lehet feljutni.



8. ábra: 290 m magas távvezeték tartó oszlopok

A Minas Gerais államban, az 1000 m magas Brazil Felföldön eredő és az Atlanti Óceánba Maceió és Aracaju városok között torkolló Rio São Francisco, a negyedik leghosszabb folyó Dél-Amerikában a maga 2914 km-vel. Átlagos vízhozama 3000 m³/s, míg maximális értéke a 12 000 m³/s-t is elérheti. Rajta 9 db, összesen 12 475 MW EBT-jű vízerőmű üzemel.

Ezen épült a 1050 MW-os **Sobradinho** vízerőmű 4214 km²-es tározója.

Az Amazonas-medence vízerő-potenciáljának kihasználását nem a főágon, hanem a bővizű mellékfolyókon kezdik, pl. a Madeira-projekt keretében: a brazil amazóniai esőerdős vidéken tervezik a 3750 MW-os **Jirau** és a 3150,4 MW-os **Santo Antônio** tározás nélküli folyami (run-of-the-river) erőműveket. Az Jirau erőművet 50 db 75 MW-os, míg a Santo Antônio-t 44 db 71,6 MW-os vízszintes tengelyű Kaplan-csőturbina fogja alkotni. A világon épülő leghosszabb, 2375 km-es egyenáramú összeköttetése, mely ennek a két erőműnek a teljesítményét fogja a Porto Velho alállomástól közbenső alállomás nélkül az Araraquara alállomásig, a legiparosodottabb Sao Paulói körzetbe szállítani. A két alállomás között 2 db egyrendszerű, egyenként 3150 MW átviteli kapacitású ±600 kV-os egyenáramú távvezeték épül ki. A tervezők ezt a konstrukciót megbízhatóbbnak tartják, mint az egyébként olcsóbban, kisebb terület felhasználással kivitelezhető kétrendszerű összeköttetést.

A Madeira-projekt keretében a folyó bolíviai, illetve brazil-bolíviai közös szakaszán is épül vízerőmű: a **Cachuela Esperanza** és a **Guajará Mirim**. Ez lehetővé teszi, hogy Bolívia, amely a Chilével vívott 1884-es háborúban

elvesztette csendes-óceáni partvidékét, most az erőművekkel hajózhatóvá tett Madeirán és az Amazonason át kihajózzon az Atlanti-óceánra.

Az Amazonasba annak atlanti-óceáni torkolatától kb. 300 km-re beömlő **Xingu** folyón tervezik a 11 200 MW-os **Belo Monte** erőművet és 550 km²-es tározóját. Ez az építkezés váltotta ki az eddigi legnagyobb tiltakozást mind az indián őslakosság, mind a brazil és nemzetközi környezetvédők részéről. A tiltakozás oka, hogy az őslakosok féltik őserdei lakóhelyüket és földjeiket, halászati-vadászati lehetőségeiket, és tartanak az idegen telepések beözönlésétől, akik főleg szójatermesztésből akarnak megélni, s evégből irtanák az esőerdőt.

Brazília szélenergia-potenciálja és hasznosítása

A Brazil Energiahivatal becslése szerint az ország nagy földrajzi régióinak szélenergia-potenciálja 50 méteres magasságban 126,5 GW, amely még a 2011 évi 115 GW-os EBT-t is meghaladja. Más becslések szerint ez a potenciál 100 m magasságban akár 350 GW is lehet.

A teljes beépített szelerőmű kapacitás 2011-ben körülbelül 2 GW volt, de a tervek szerint ezt 2020-ra 27 GW-ra tervezik növelni, ezzel is csökkentve a túlzott időjárás függőséget a hatalmas vízenergia hányad miatt. 2011 közepén a szélenergia ára 86 USD/MWh volt, a vízenergiáé pedig 76 USD/MWh.



9. ábra: Szélfarm az esőerdőben

A szélfarmok telepítésére az esőerdőkben is van lehetőség, hiszen elég egy viszonylag keskeny bejárót nyitni a turbinák megközelítéséhez.

Rio Grande do Sulban, az ország legdélebbi államában 2012-től kezdve 108 MW-os szelerőmű parkot építettek. A szélfarmot 40 darab 2,7 MW-os ECO 122 típusú Alstom szélturbina alkotja, melyek rotorátmérője 122 méter.

Az Alstom legújabb fejlesztésének prototípusa a belga tengerparton található.

Ezen szélturbina teljesítménye már 6 MW, rotorátmérője pedig 150 méter. A rotor közbelső áttétel nélkül hatja meg az állandó mágnesű generátort, így kevesebb részegységet kell karban tartani. Ez a gép lesz a jövő szélturbínája. Ebből a típusból 2016-tól kezdve évente 100 darabot fognak gyártani.



10. ábra: Az Alstom ECO 122 típusú szélturbínája

A Brazíliában megtalálható szélturbinák másik nagy gyártója a Gamesa cég, amely több száz gépet szállított az országba.

Nagy az igény a szélturbinák hatékony villám- és tűzvédelme iránt, hiszen rendkívül gyakori a rotort érő villámcsapás. Ugyan a lapátban nincs fém, az üveg- vagy karbonszálak anyagnak nagyobb a relatív permittivitása, mint a levegőé, ezért torzítja (inhomogenizálja) a körülötte késő villamos teret. Ez által pedig a lapát a hegye ellenkísülés talppontja lehet. Másik gyakori meghibásodás a turbinákban a csapágyhiba miatti túlmelegedés, amely hatalmas tűzhez vezethet a turbina belsejében.

Nukleáris energetika

Az ország egyetlen atomerőműve az Atlanti óceán partján, Angra dos Reis városában található. Az első 609 MWe teljesítményű Angra-I PWR blokkot 1985-ben helyezték üzembe, míg a már 1280 MWe teljesítményű Angra-II PWR blokkot 2000-ben. 1984-ben elkezdték megépíteni a 1405 MWe teljesítményű Angra-III blokkot is, de annak kivitelezését a csernobili tragédia hatására két év elteltével le is állították. Az építést 2010-ben kezdték újra, az üzembe helyezését pedig ebben az évben, 2015-ben tervezik. Ezen kívül az ország 2020-ig további 4 darab 1200-1500 MW-os blokkot szándékozik telepíteni.



11. ábra: Angra atomerőmű

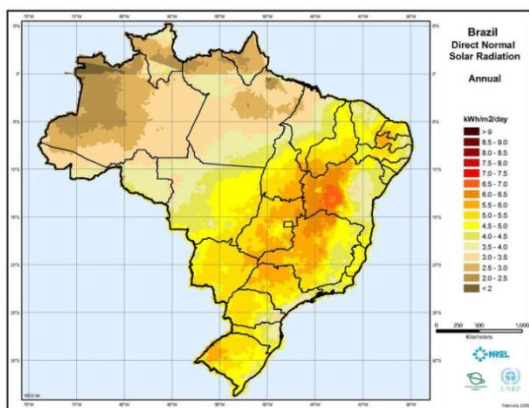
Az üzem területén található a kiegészítő fűtőelemek újrafeldolgozás előtti ideiglenes tárolója, illetve a radioaktív hulladékok ideiglenes tárolója is.

Napenergetika

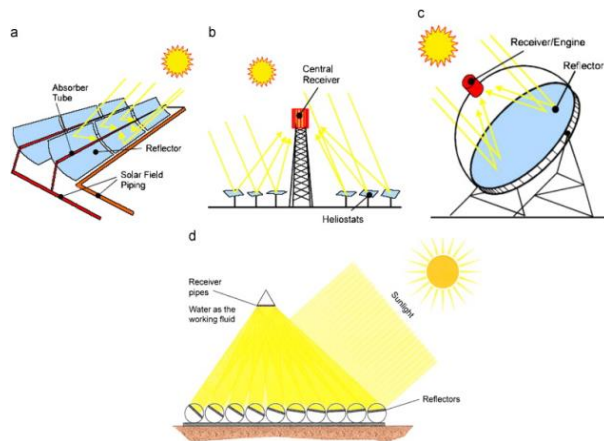
Brazília napenergia potenciálja az alsó ábrán látható. Szakértők szerint ez a potenciál 4-5-szöröse a szélnek.

A napenergia közvetett hasznosítására négy módszert alkalmazhatunk:

- a, Vályús parabolatükrös gőzfejlesztő
- b, Koncentrátortornyos gőzfejlesztő
- c, Parabolatányéros koncentrátor Stirling-motoros áramfejlesztővel
- d, Lineáris Fresnel-tükrös gőzfejlesztő



13. ábra: Brazília napsugárzási térképe [kWh/m²nap]



12. ábra: Közvetett napenergia hasznosítás lehetőségei

A **vályús parabolatükör** tükörrendszerét szervomotorok segítségével állítják olyan szögbe, hogy a parabola főtengelye mindig a napsugárzás irányának síkjába essen. Így a visszavert sugárzás a fókuszvonalban lévő csőben koncentrálódik. A sugárgyűjtő cső külső eleme kívülről fény-visszaverődést gátló bevonattal ellátott, vákuumálló üvegcső, belső eleme hőelnyelő burkolattal bevont nyomásálló rozsdamentes acélcső. A két cső között vákuum van, amely megakadályozza a belső csőben összegyűlt hő visszaáramlását. A belső csőben olaj kering, amelyet a naphő 400°C-ig hevít. A felforrósodott olaj egyik része a hőcserélőben gőzt fejleszt, amellyel a turbógenerátort hajtják, a másikat pedig egy hőszigetelt edénybe továbbítják, majd ott tárolják. Ezzel a megoldással lehetőség van éjszaka is áramot termelni a napközben összegyűjtött naphőből.

A **koncentrátortornyos gőzfejlesztőt** szervomotorral két irányban állítható tükrök rendszere veszi körül. Ezek a tükrök fókuszálják a torony tetején lévő gyűjtőbe a napsugarakat. Itt a primer körű hőhordozó, a 220°C olvadáspontú salétromsó (60% nátriumnitrát + 40% káliumnitrát) 566°C-ra hevül föl. Ez hőcserélőben 545°C, 140 bar kezdő paraméterű, szekunder körű túlhevített vízgőzt állít elő. A primer körű forró só egy részével biztosítják a turbina fokozatok közötti újrahevítést, illetve a gőzfejlesztőből kilépő sóolvadékkal a tápvíz előmelegítést is. Ezek után éri el a salétromsó a 288°C-os hideg hőmérsékletet.

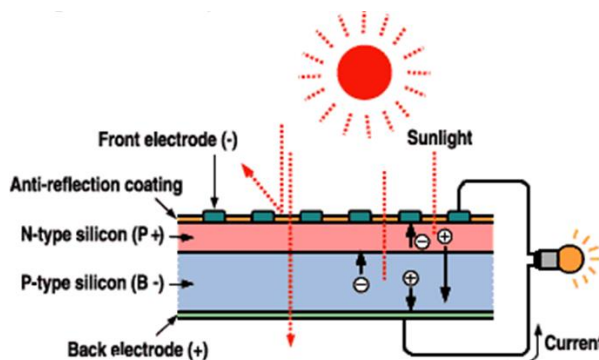
Ez a sóolvadék jól használható a naphő tárolására is, hiszen mérések alapján egy 110 MWh hőkapacitású tartályban, hővesztés nélkül 1 hónap alatt 540°C-ról csupán 470°C-ra csökken hőmérséklete.

A **parabolatányéros koncentrátor** esetében egy két irányban mozgatható, a nap pályáját követő forgásparaboloid tükör fókuszában helyeznek el egy hidrogén munkaközeget hevítő sugárkoncentrátorral rendelkező Stirling-motor. A motor 25 kW-os háromfázisú váltakozó áramú kompakt generátort

hajt meg, melynek teljesítménye rögtön a helyi elosztóhálózatba, vagy gyűjtve és feltranszformálva az átviteli hálózatba táplálható.

A **lineáris Fresnel-tükrös gőzfejlesztő** elve ugyanaz, mint a vályús parabolatükröse, de itt a fókuszvonalban lévő csőben keringetett hőhordozót (desztillált vizet) a fókuszvonalra irányított lineáris síktükrök rendszere által visszavert napsugárzás hevíti. Ezeket a tükröket is szervomotorok fókuszálják.

A napenergia közvetlen hasznosítására a fotovoltaiikus elemek adnak lehetőséget. Ha a napfény fotonjainak energiája nagyobb, mint a szilíciumatom elektronjainak kilépési energiája, akkor a beeső foton hatására egy elektron kiszakad a kötésből és szabaddá válik. Ennek hatására pedig áram indul meg az elemben.



14. ábra: Fotovoltaiikus elem működési elve

A Bioenergy brazil cég 152 MW-os fotovoltaiikus naperőműt üzemeltet az északkeleti Bahia államban. Ennek a fajlagos beruházási költsége 1/3-a az olajtüzelésű erőműének, beleértve a napelemek által termelt egyen-áram konverzióját is az elosztó- és az átviteli hálózat váltakozó áramára.

A 2014-es labdarúgó világbajnokságra épített új stadion energiaellátását is napelemekkel oldották meg. Ez a világ első „nettó zéró energiájú” stadionja, azaz energiaszükségletét a tetőt borító napelem-fóliából tudja fedezni. Az építmény vízigényét is a tetőre hulló esővíz összegyűjtése és tisztítása útján elégítik ki.

A Joinville-ben működő Flexsolar cég és a németországi Potsdam-Golmban lévő Fraunhofer Alkalmazott Polimer Kutató Intézet közös fejlesztése a hajlékony szerves napelem cella (flexible organic solar cell). A projektet a brazil kormány „Luz para todos” („Fényt mindenkinek”) programja támogatja. Ennek eredménye a tekerceselhető napelem fólia, amelynek alkalmazása számtalan eddig kihasználatlan helyen teszi lehetővé a villamos áram termelést. Ilyen például a repülőgépek teteje, melyet energia termelésre felhasználva a gép tömege is sokkal csökkenthető. Az áttetsző fóliát akár balkonok korlátaira felragasztva is alkalmazhatjuk. Egy



15. ábra: Ultrakönnyű napelemes repülőgép

brazil tervezésű ATM esetében is napelemekkel látják el a működéshez szükséges áram igényt.

Biomassza-energetika

Brazília	USA
Alapanyag: cukornád	Alapanyag: gabona (főleg kukorica)
Nádcukor → etanol	Gabona(keményítő) → cukor → etanol
5 évig csak vágják, a 6.-ban ültetik	Évente kell vetni, aratni
Átlagtermés: 90 t/ha (~11 t nádcukor/ha)	Átlagtermés: 21 t/ha (~6 t keményítő/ha)
~5300 l etanol/ha	~4000 l etanol/ha
Cukornád-etanol fajlagosan olcsóbb	Gabona-etanol fajlagosan drágább
3,6 millió ha-on termelnek etanol-nádcukrot	73 millió ha-on termelnek etanol-gabonát
A termőterület „korlátlanul” növelhető	A vetésterület más növény kárára növelhető

16. ábra: A világmásodik Brazília és a világelső USA bioetanol-termelésének összehasonlítása

A Petrobras 2009. 12. 31-én avatta fel a Juiz de Fora városban épült kétblokkos, 87 MW-os erőművet, melynek General Electric gyártmányú, LM6000 típusú, 43,5 MW-os nyíltciklusú gázturbinái kizárólag bioetannal üzemelnek. NO_x kibocsátásuk 30%-kal kisebb, mint a földgázzal üzemelő hasonló blokkoké.

Az előadónk összefoglalta Brazília villamos energetikájának jellegzetességeit, kitérve minden fontosabb erőműre és átviteli egységre. A brazil energiaipar jó példával szolgálhat mindenki számára, hiszen rövid idő alatt feljutott a világ gazdaságilag vezető országai közé. Energiaiparát a földrajzi adottságoknak megfelelően építette ki és nagy hangsúlyt fektet a fenntartható és környezetbarát technológiák használatára is. Külön követendő példaként szolgálhat, hogy a nagy energiaigényű stadionok mind áram-, mind vízellátását ily módon valósította meg.

Erdős Boglárka
az Energetikai Szakkollégium tagja