

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

IMS – Modelování a simulace

2. Uhlíková stopa v energetice a teplárenství

Simulace kombinované solárně-vodní elektrárny

8.12.2019

David Mikšaník (xmiksa05)
Adam Pankuch (xpanku00)

1 Úvod

Uhlíková stopa je jedním z měřítek zatížení životního prostředí. Tedy pro zkvalitnění životního prostředí je potřeba omezit její tvorbu. Většina světově vyrobené elektřiny pochází z tepelných elektráren, které ovšem produkují největší uhlíkovou stopu ze všech typů elektráren jak můžeme vidět na Obrázku 2. Naším snahou je nahradit tyto tepelné elektrárny alternativními obnovitelnými zdroji energie, které jsou šetrné k životnímu prostředí, ale jsou schopné vyprodukovat stejné množství energie.

Výhoda tepelné elektrárny je taková, že dokáže měnit svůj výkon podle poptávky energie, na rozdíl od elektráren pracujících s obnovitelnými zdroji. Ve zbytku práce se omezíme pouze na solární elektrárny.

Solární elektrárny nedodávají stabilně energii do sítě, protože v noci nebo za špatného počasí (kdy dopadá na zemský povrch nižší množství sluneční energie) generují žádné nebo malé množství elektřiny. Dalším problémem je, že v jistý moment mohou generovat více elektřiny než je potřeba. Jedno z možných řešení jsou záložní baterie, do kterých se ukládá přebytečná elektřina a uvolňuje se v případě potřeby.

Baterie ukládají elektrickou energii ve formě chemické energie, podobně můžeme uložit elektrickou energii do potenciální energie vody a tuto energii získávat pomocí vodní elektrárny, viz Kapitola 2. Takové elektrárny nazýváme *solárně-vodní* [6]. Poznamenejme, že elektrárna pracuje pouze s obnovitelnými zdroji a při své činnosti produkuje minimální uhlíkovou stopu.

Smyslem experimentů je demonstrovat, že solárně-vodní elektrárny mohou sloužit jako stálý, dlouhodobý přísun energie podobně jako tepelné elektrárny. Na základě modelu ([8], str. 7) a simulačních experimentů ([8], str. 8) se snažíme pro konkrétní počet domácností najít vhodnou solárně-vodní elektrárnu, tak aby každá domácnost byla nepřetržitě zásobována elektřinou.

1.1 Řešitelé a zdroje informací

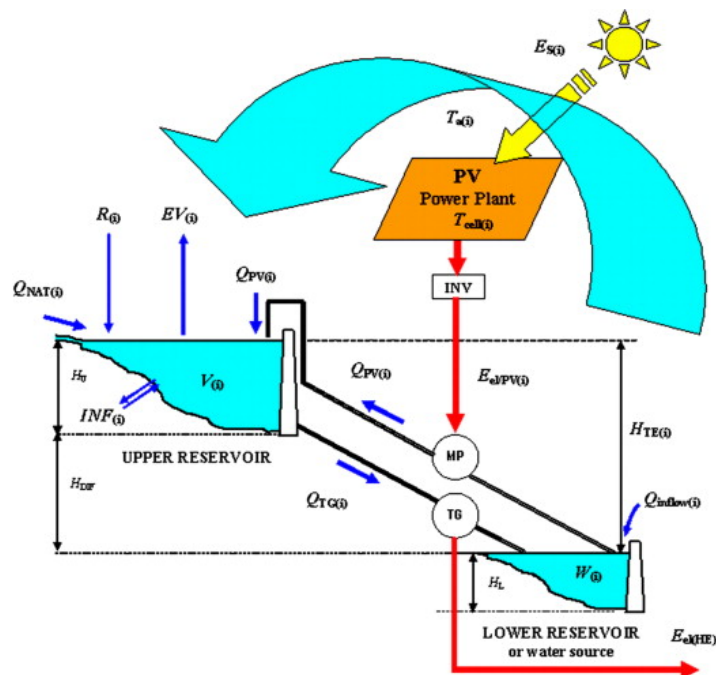
Na řešení projektu se podíleli pouze David Mikšaník a Adam Pankuch. Před navržením modelu jsem musel nastudovat principy solární a vodní elektrárny. Zejména jejich kombinací [6]. Prozkoumali jsme vliv lokality a počasí na efektivitu solární elektrárny [1]. Vyhledali jsme typickou spotřebu domácnosti ve vyspělých zemích [5]. Při tvorbě projektu byly využívány znalosti nabyté v předmětu Modelování a simulace [8].

1.2 Experimentální ověřování validity modelu

Validita modelu ([8], str. 37) byla pravidelně experimentálně ověřována následujícím způsobem. Vhodně jsem si zvolil parametry modelu pro simulování specifické situace pro které jsem schopni získat výsledek i bez modelu (všechny náhodné jevy v modelu jsem eliminovali, např. pravděpodobnost, že bude slunečno jsme nastavili na 1). Poté jsme spustili simulaci a porovnali výsledek simulace s našimi výpočty.

V případě, kdy jsme simulovali model pro obecné nastavení parametrů (prvky náhodnosti jsou tedy aktivní) jsme chování modelu ([8], str. 24) museli ověřovat jinak: vypisovali jsme si na standardní chybový výstup informace o stavech proměnných, včetně hodnot proměnných, které jsou určují pseudonáhodně ([8], str. 97) až při běhu programu. Tyto výpisy jsme následně ručně analyzovali. Ve všech případech se model choval jak měl. Ovšem toto řešení bylo možné jen pro krátký běh simulace.

V následující části textu předpokládáme, že model bude odpovídat realitě i pro složitější a komplexnější příklady.



Obrázek 1: Schéma solárně-vodní elektrárny. [6]

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Na Obrázku 1 můžeme vidět schéma solárně-vodní elektrárny, kterou simulujeme v našem modelu. Elektrárna je složena z 5 hlavních částí:

- **solární elektrárna** - na obrázku označena jako: *PV Power Plant*
- **vodní elektrárna (turbína + generátor)** - na obrázku označena jako: *TG*
- **horní nádrž vody** - na obrázku označena jako: *Upper Reservoir*
- **dolní nádrž vody** - na obrázku označena jako: *Lower Reservoir*
- **čerpadlo (pumpa)** - na obrázku označena jako: *MP*

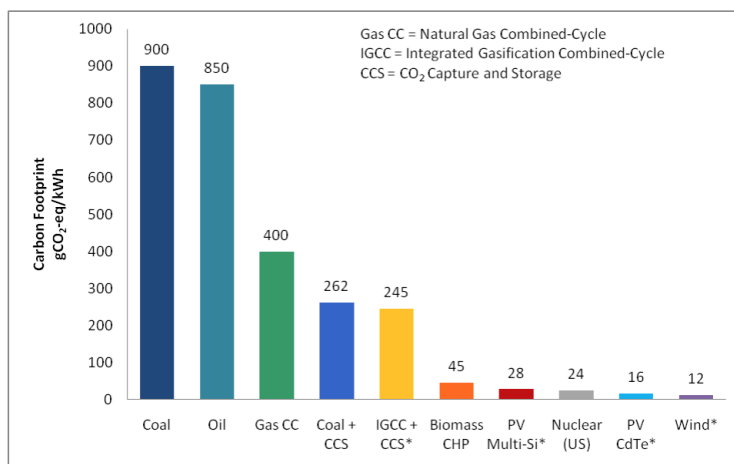
Princip fungování tohoto typu elektrárny je následující:

V průběhu dne je hlavním producentem elektřiny solární elektrárna a vodní elektrárna je vypnuta (zapne se jen špatného počasí, kdy solární elektrárna nestíhá produkovat dostatečné množství energie do sítě). Přebytečná elektrická energie vytvořená solární elektrárnou, které není využita spotřebiteli se využije na přečerpání vody z dolní nádrže do horní nádrže. Tímto se vlastně přebytečná elektrická energie uloží ve formě potenciální energie, kterou vodu získá přesunem do horní nádrže.

V noci, kdy solární elektrárna neprodukuje žádnou elektrickou energii se spouští vodní elektrárna, která vypouští vodu z horní nádrže do dolní nádrže. Pomocí turbíny a generátoru vytváří elektrickou energii, kterou zásobuje spotřebitele.

Solární panely

Pro naši solární elektrárnu jsem vybrali fotovoltaické solární panely založené na využití *teluridu kadmia*, dále jen *CdTe*. Tyto solární panely jsem vybrali na základě dvou vlastností: 1) nižší uhlíková stopa v porovnání s konkurenčními panely založenými na využití *polykrystalického křemíku*



Obrázek 2: Uhlíková stopa při různých technologiích výroby elektrické energie. [2]

jako můžeme vidět na Obrázku 2 a 2. nižší cena v porovnání s křemíkovými panely. Nevýhodou těchto panelů je že jejich efektivita se pohybuje jen okolo 16-18% oproti křemíkovým, které mají vyšší efektivitu.

Dále uvažujeme o využití konkrétních CdTe solárních panelů od firmy First Solar, Inc., konkrétně First Solar Series 6 Module [3]. Solární panely tohoto typu mají efektivitu 17%, tedy $e = 0.17$. A rozměry přibližně $1m \times 2m$, tedy plochu $S_{PV} = 2m^2$.

Počasí a jeho vliv na výkon solárních panelů

Na výkon solárních panelů má vliv několik faktorů, z kterých nejdůležitější jsou počasí, teplota a výška slunce nad horizontem. Vycházíme z výzkumu vlivu množství oblačnosti a výšky slunce nad horizontem na výkon slunečního záření dopadajícího na zemský povrch (označujeme: P_S). Výsledky můžeme vidět na Obrázku 3. Tento výzkum byl proveden v Krakowe (2004-2007) a můžeme předpokládat, že podobné výsledky budou i v jiných lokalitách v mírném pásmu na této zemské šířce. Z těchto hodnot si můžeme vypočítat výkon First Solar Series 6 CdTe solárního panelu s plochou $1m^2$ za určitých světelných podmínek následujícím způsobem:

$$P_{PV} = e \cdot P_S$$

kde e je efektivita First Solar Series 6 CdTe panelu (viz výše) a P_S je výkon slunečního záření dopadajícího na $1m^2$ zemský povrchu.

Na základě této studie jsme si zvolili slunečný výkon dopadající na zem při různých slunečných podmínkách následovně:

1. **Slunečně** (stupeň oblačnosti: 0 - 2) - $648W/m^2$
2. **Polojasno** (stupeň oblačnosti: 3 - 5) - $547W/m^2$
3. **Zataženo** (stupeň oblačnosti: 6 - 8) - $326W/m^2$

Střídání dne a noci

Východ a západ slunce je důležitým údajem, protože je to přesně rozmezí v kterém sluneční energie generuje elektrickou energii. Tento údaj se liší podle polohy na zemi a datumu. Konkrétního hodnoty jsme používali z [4].

Degree of cloudiness (in octas)	Sun's height above the horizon [h°]					
	$h^\circ < 20$	21-30	31-40	41-50	51-60	$h^\circ > 60$
0	235	354	531	668	751	819
1	247	399	525	653	775	825
2	230	301	502	623	725	807
3	228	295	467	612	714	767
4	199	287	423	546	590	752
5	155	272	408	483	582	624
6	152	233	359	425	574	599
7	129	169	311	367	387	475
8	62	109	178	196	219	270

Obrázek 3: Asociace výkonu slunečního záření dopadajícího na $1m^2$ zemského povrchu v $[Wm^2]$ s množstvím oblačnosti a výšky slunce nad horizontem v Krakowe (2004-2007). [1]

Vodní elektrárna a zásobník vody jako způsob uložení energie

Připomeneme si, že horní nádrž vody slouží při tomto typu elektrárny jako jistý způsob uložení energie. Aktuální potenciální energii vody v horní nádrži, tedy aktuální "uloženou energii", můžeme popsat vzorcem:

$$E_Z = \rho \cdot g \cdot V \cdot H$$

kde ρ je hustota vody, g je tíhové zrychlení, V je aktuální objem vody v zásobníku, H je výškový rozdíl mezi horním a dolním nádrží.

Energie, kterou jsme schopni získat ze zásobníku pomocí vodní turbíny a generátoru:

$$E_G = E_Z \cdot \eta_G$$

kde η_G je efektivita vodní turbíny s generátorem.

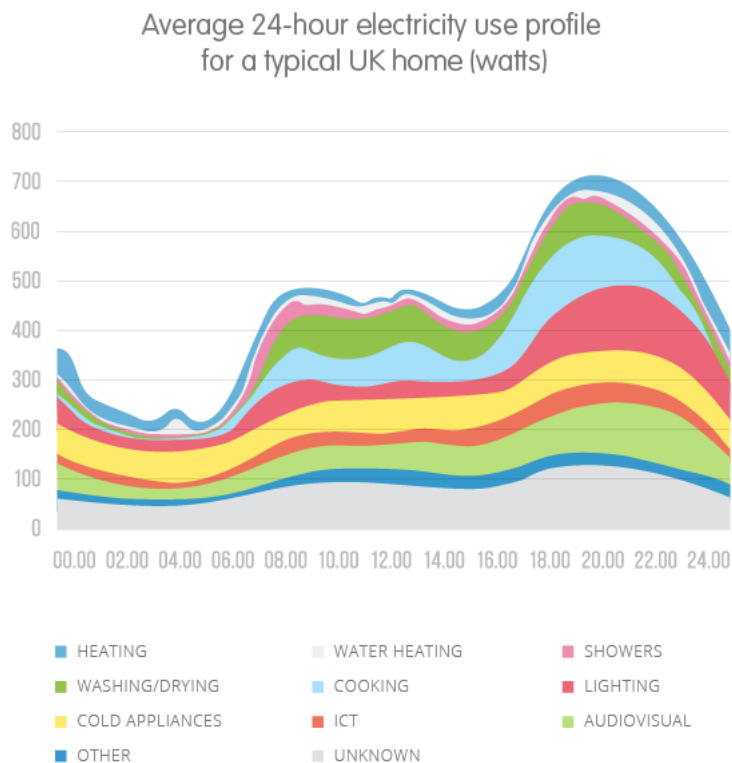
Energie, potřebná na vytlačení jistého objemu vody pomocí čerpadla (pumpy) z dolní nádrže do horní nádrže:

$$E_G = \frac{\rho \cdot g \cdot V \cdot H}{\eta_P}$$

kde ρ je hustota vody, g je tíhové zrychlení, V objem vody, který chceme pomocí čerpadla vytlačit, H je výškový rozdíl mezi horním a dolním nádrží. a η_P je efektivita čerpadla (pumpy).

Spotřeba domácností

Spotřeba domácnosti se v průběhu dne mění, jako můžeme vidět v Obrázku 4. Tento obrázek zobrazuje spotřebu domácnosti ve Spojeném království, ale můžeme předpokládat že podobná spotřeba domácnosti bude aj v jiných vyspělých (evropských) zemí. Na základě tohoto obrázku jsme se rozhodli rozdělit velikost spotřeba jedné domácnosti na 3 různé úrovně:



Obrázek 4: Průměrná spotřeba (ve Wattech) domácnosti v průběhu dne ve Spojeném království Velké Británie a Severního Irska (2012). [5]

1. **Nízká spotřeba** - 200W mezi 0:00 - 8:00
2. **Střední spotřeba** - 450W mezi 8:00 - 17:00 a 23:00 - 0:00
3. **Vysoká spotřeba** - 625W mezi 17:00 - 23:00

2.1 Použité postupy pro vytváření modelu

Pro popis modelu jsme použili Petriho síť ([8], slajd 123–135). Pro simulační model ([8], slajd 44) jsme použili programovací jazyk C++ a knihovnu SIMLIB. Výběr jazyka C++ byl podmíněn již existující knihovnou SIMLIB, které je jednoduchou nadstavbou nad C++ a poskytují prostředky pro provádění simulace (diskrétní, spojitě i kombinované).

2.2 Použité technologie

Pro vytvoření simulačního programu jsme použili jazyk C++11 a knihovnu SIMLIB [9]. Pro přehlednost a efektivitu při spouštění programu pro různé parametry jsme použili knihovnu Config4* [7]. Ta nám dovoluje zadat argumenty ve formě konfiguračního souboru. Oba prostředky jsou open-source.

3 Koncepce

Náš model splňuje fakta z "Rozbor tématu a použitých metod/technologií", až na následující omezení, které mají jen nepatrný vliv na výsledek:

1. Nepočítáme přímo s vlivem teploty na efektivitu solárních panelů. Tento údaj je částečně zahrnut v účinnosti solárních panelů.
2. Zanedbáváme dobu přesunu vody z dolní nádrže do horní, protože předpokládáme, že pokud elektřina není potřeba ihned, tak nebude ani po dobu transportu.
3. Zanedbáváme dobu generování elektřiny z vodní elektrárny, protože předpokládáme, že je schopná předpověď kdy bude elektřina potřeba a začne generovat z předstihem.
4. Předpokládáme, že objem vody v systému je konstantní, tj. voda se ani nevypařuje, ani nepřibývá když prší. Tento fakt je zanedbatelný z následujících důvodů. Za prvé, doba modelovaného času v prováděných experimentech je krátká, aby se tato situace mohla projevit. Za druhé, pršení částečně eliminuje vliv vypařování.
5. Předpokládáme, že dolní a horní nádrže mají stejný objem. Můžeme se na to dívat tak, že maximální objem vody v systému je roven objemu menší z nádrží. Tento předpoklad je pouze pro zjednodušení modelování, protože v této situaci víme, že vodu můžeme vždy transportovat z dolní nádrže do horní nádrže tak, aby se voda neztratila (nepřetekla by ven z nádrže).

3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

V horní části Petriho sítě na Obrázku vidíme část simulující průběh dne. Na začátku každého dne se vygeneruje počasí podle pravděpodobnosti a nastartuje generátor (levá část Petriho sítě). Generátor začne produkovat určité množství energie za jednotku času podle počasí. Na konci dne potom dochází k zastavení činnosti generátoru a počasí (aby jsme jej zase mohli nastavit následující den). Vygenerovaná energie zůstává po dobu jednotky minutu na odběr (do té doby než generátor vygeneruje). Tímto simulujeme fakt, že ve skutečnosti elektrárna generuje energii spojitě co každý okamžik. V pravé části Petriho sítě dochází k odběru elektřiny. Velikost odběru elektřiny je nastaven na vysokou spotřebu. Střední a nižší spotřebu poté simuluje tím že měním čas zpracování elektřiny — časovaný přechod s $\exp(\text{čas})$. V dolní části Petriho sítě dochází k uložení energie pokud o ní nebyl zájem po jednotku času. V případě že, nemáme co přečerpat z dolní nádrže do horní nádrže tak energie vystupuje se systémem. Pokud energii chceme uložit, tak se převede pouze část. Tímto simulujeme efektivitu čerpadla a turbíny. Poté je uložena v horní nádrži a čeká na až o ní bude zájem (např. v noci).

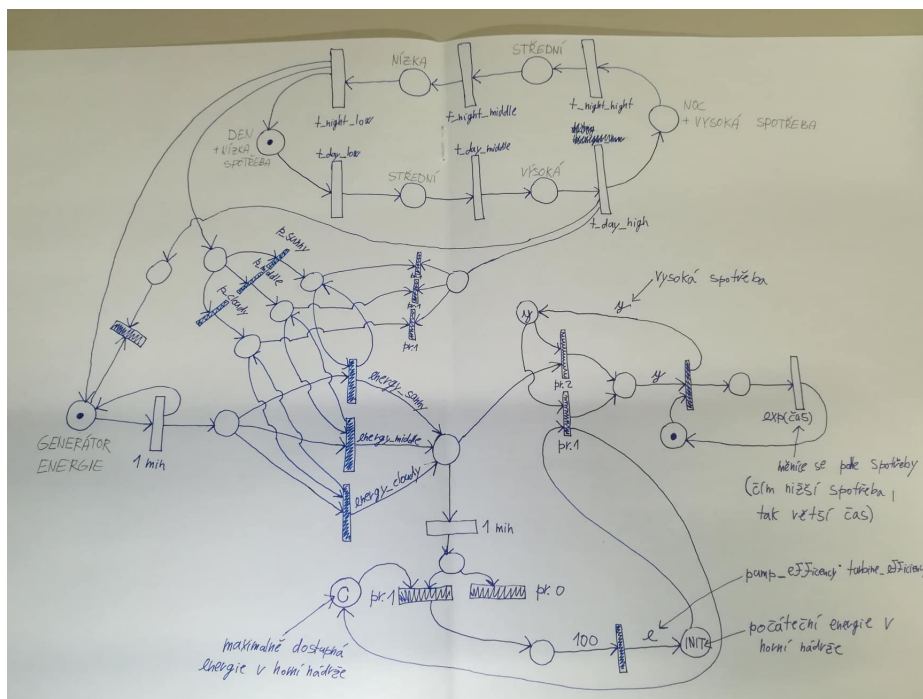
3.2 Formy konceptuálního modelu

Abstraktní model solárně-vodní elektrárny je popsán pomocí Petriho sítě na Obrázku 5.

4 Architektura simulačního modelu

Model je implementovaný v jazyku C++11 využívající knihovny SIMLIB a Config4*, viz Podkapitola 2.2. Simulační program dovoluje nastavit 19 různých parametrů:

- `t_day_low`, `t_day_middle`, `t_day_high` — nastavuje dobu trvání periody dne, kdy slunce produkuje sluneční energii a zároveň je spotřeba buď nízká, střední nebo vysoká,



Obrázek 5: Model popsáný pomocí Petriho sítě

- t_night_high , t_night_middle , t_night_low — nastavuje dobu trvání periody dne, kdy slunce neprodukuje sluneční energii a zároveň je spotřeba buď nízká, střední nebo vysoká,
- p_sunny , p_middle , p_cloudy — značí po řadě pravděpodobnost (v %), že bude jasno, polojasno, zataženo,
- $energy_sunny$, $energy_middle$, $energy_cloudy$ — značí po řadě energii, kterou vyprodukuje solární energie za jednotku času, když je jasno, polojasno, zataženo,
- $high_consume$, $middle_consume$, $low_consume$ — značí po řadě energii, která je spotřebovávána při vysoké, střední, nízké spotřebě za čas daný exponenciálním rozložením se středem 1, kde 1 je jednotka času,
- $reservoir_capacity$, $reservoir_init$ — maximální energie uložená v horní nádrži, počáteční energie uložená v horní nádrži, respektive,
- $pump_efficiency$ — efektivita čerpadla ve vodní elektrárně (v %),
- $turbine_efficiency$ — efektivita turbíny ve vodní elektrárně (v %).

4.1 Mapování abstraktního modelu do simulačního

Každá třída implementuje jednu část simulačního modelu. `Process` je abstraktní třída implementována v knihovně `SIMLIB`.

Třída `DayCycle` je odvozená z `Process`. Její úkolem je měnit v pravidelných intervalech stavy určující zda slunce produkuje sluneční energii a velikost spotřeby. Také na začátku každého dne vygeneruje nové počasí (jasno, polojasno, zataženo). Vše je nastavitelné pomocí parametrů, viz začátek Kapitoly.

`Energy` Reprezentuje jednu jednotku energie (většinou v Mega Joulech MJ nebo Giga Joulech GJ). Její konec je v moment, když je spotřebovávaná.

Třída `Generator` je odvozená z `Process` a slouží pro pravidelné generování procesů energie `Energy` za jednotku času (pouze ve dne). Jejich počet je závislý na vybraném počasí třídy `DayCycle`.

Třída `Checker` je odvozená z `Process`. Jejím úkolem je dodávat energií do domácnosti, které spotřebují několik jednotek energie za $\exp(1)$ času.

Potenciální energie v horní nádrži vodní elektrárny je znázorněna třídou `Store`, která na požádání uvolní energii.

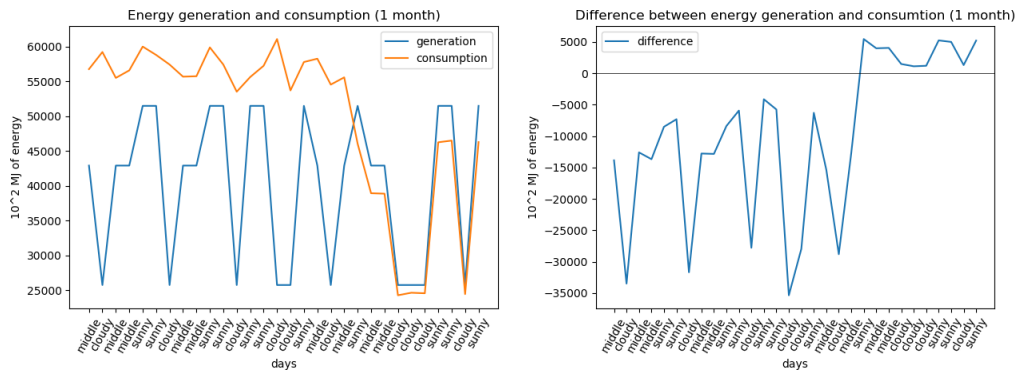
5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Vykonáváme experimenty z hypotetickou elektrárnou složenou se solární elektrárny a vodní elektrárny, tzv. solárně-vodní elektrárna. Naším cílem je zjistit, jak velká elektrárna musí být tak, aby dokázala zásobovat bez přerušení určitý počet domácnosti.

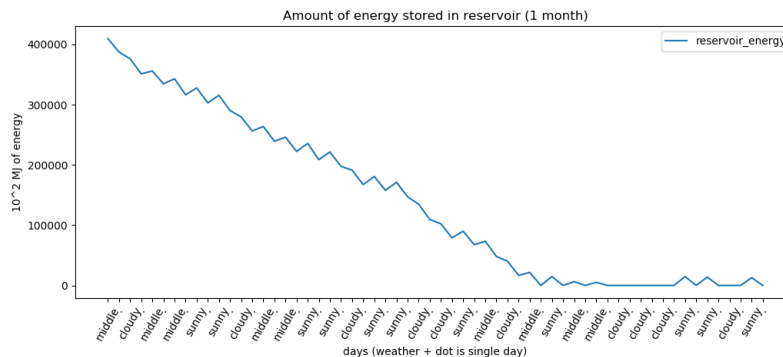
Pomocí modelu simulujeme střídání dne a noci, proměnlivý odběr elektřiny v průběhu dne a proměnlivé počasí. Solární elektrárna produkuje pouze ve dne.

5.1 Postup experimentování

Jednotlivé experimenty ukazují náš postup. Nejprve jsme začali s elektrárnou, která by průměrně neměla zásobovat domácnosti bez výpadku. Poté jsme postupně zvyšovali počet solárních panelů, tím jsme získali větší výkon solární elektrárny. Tedy pokud zvýšíme výkon elektrárny, tak situace, že by nějaké domácnost zůstala bez energie se zmenšuje. Tento vývoj lze vidět na grafech v experimentech 1 až 4.



Obrázek 6: Na levém grafu je zobrazeno množství vygenerována energie solární elektrárnou (pro každý den je zobrazen typ počasí) a spotřeba. Na pravém grafu je rozdíl mezi množství vygenerované energie solární elektrárnou a spotřebované energie. Pro jeden měsíc.



Obrázek 7: Velikost potenciální energie uložené v horní nádrži v průběh měsíce.

5.2 Experimenty

Experiment 1

V tomto experimentu jsme nastavili všechny parametry přesně jak v Tabulce 1. Tyto údaje vznikly následujícím způsobem. Inspirovali jsme se solární Topaz Solar Farm, (USA, Kalifornie) která je jednou z největší solárních elektráren na světě a zásobuje 160 000 domácností. V našem modelu jsem tedy taky počítali ze zásobování 160 000 domácností a vypočítali jaký budou mít celková odběr a nastavili jsme podle toho parametry, high consume, middle consume, low consume. Předpokládali jsme vodní elektrárnu, která má obě nádrže o objemu $52 \cdot 10^6 m^3$. Převýšení mezi dolní a horní nádrží je 600m. Takovou velkou přehradu využívá solárně-vodní elektrárna Espejo de Tarapaca v Chile Podle těchto údajů jsem vypočítali maximálně možnou energii vody v nádrži, pomocí vzorce

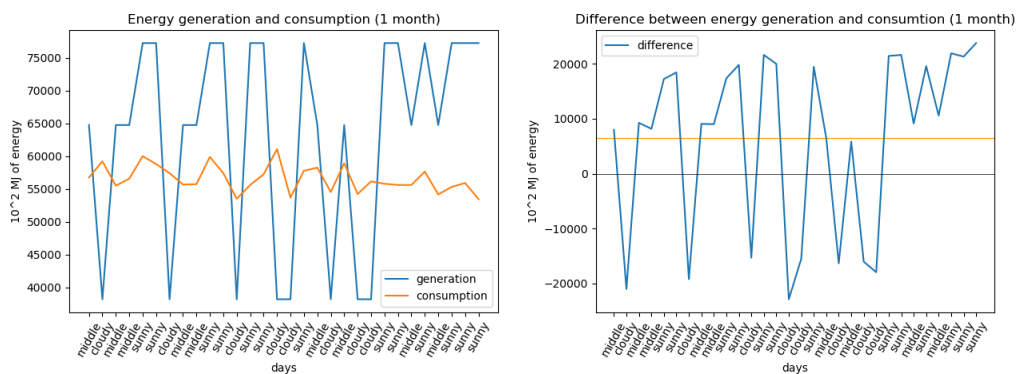
$$E_Z = \rho \cdot g \cdot V \cdot H = 1000 \cdot 9.8 \cdot 52 \cdot 10^6 \cdot 600 = 305760 GJ.$$

Běh simulace jsme nastavili na 30 dní, což je 43 200 minut. Celková plocha solární panelu jsem nastavili na $1 km^2$. A podle toho jsem vypočítali jaká energie je produkovat solární elektrárnou podle počasí, to jsou hodnoty v proměnných energy sunny, energy middle, low middle. Energii horní nádrží jsem inicializovaly na $500000 \cdot 0.9 \cdot 0.9$. Čísla 0.9 jsou efektivita čerpadla a turbíny. Přepočítáme tedy dopředu energii, která se ztratí při generování.

Na Obrázku 7. vidíme že během měsíce se veškerá energie vyčerpala uložená v horní nádrže vyčerpala. To je dáno tím, že byla větší poptávka po elektřině, než jakou byla solární elektrárna schopna vyprodukovat, Obrázek 6. Tedy tato solární elektrárna je nedostatečná.

t day low	120min	p sunny	37%
t day middle	540min	p middle	34%
t day high	120min	p cloudy	29%
t night high	60min	energy sunny	$66 \cdot 10^2 MJ/min$
t night middle	60min	energy middle	$55 \cdot 10^2 MJ/min$
t night low	360min	energy cloudy	$33 \cdot 10^2 MJ/min$
high consume	$60 \cdot 10^2 MJ/min$	reservoir capacity	$3057600 \cdot 10^2 MJ$
middle consume	$43 \cdot 10^2 MJ/min$	reservoir init	$500000 \cdot 10^2 MJ$
low consume	$19 \cdot 10^2 MJ/min$	pump efficiency	90%
		turbine efficiency	90%

Tabulka 1: Nastavení parametrů pro experiment, jejich význam je popsán 4



Obrázek 8: TODO

Experiment 2

Pro tento experiment jsme použili většinu parametrů jako v Tabulce 1. Změnili se všechny hodnoty, které jsou závislé na velikosti solární elektrárny. V tomto případě má velikost $1.5 km^2$. Tedy změnili jsme hodnoty energy sunny, energy middle, low middle.

Na rozdíl od Obrázku 7. vidíme, že kapacita horní nádrže se nevyčerpala. Můžeme se povšimnout že série špatných počasí výrazně snižuje potenciální energii uloženou v horní nádrži. Na obrázku 8. vidíme, že průměrný rozdíl mezi generovaní energie a potřeby energie je pozitivní. Tedy tato elektrárna je soběstačná.

