

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

**MENJAVA MANJ UČINKOVITE PARNE
TURBINE TIPRA IMPULZNE S TIPOM
REAKCIJSKA ZA POVEČANJE
UČINKOVITOSTI TURBO-GENERATORSKEGA
POSTROJENJA**

Kandidat: Jaka Bradač

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor predavatelj: Dragan Gogić, mag. inž. metal. in mater.

Mentor v podjetju: Alessandro Sartor

Lektorica: mag. Nataša Koražija

Maribor, 2023

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Jaka Bradač sem avtor diplomskega dela z naslovom *Menjava manj učinkovite parne turbine tipa impulzne s tipom reakcijska za povečanje učinkovitosti turbo-generatorskega postrojenja*, ki sem ga napisal pod mentorstvom Dragana Gogića, mag. inž. metal. in mater.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli, kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, julij 2023

Podpis študenta:

ZAHVALA

Velika zahvala gre moji družini, ženi Janji in otrokoma, sinu Oskarju in hčerki Mili, za njihovo neskončno potrpljenje ob mojem službenem udejstvovanju in podpori pri opravljanju študijskih obveznosti. Ker je moje delo že mnogo let vezano na terensko prisotnost, preživijo premnoge dni sami brez očeta, a vendarle zmorejo vsakodnevne obveznosti prevečkrat opraviti brez moje pomoči. Tukaj se želim zahvaliti tudi za podporo in skrb za moje najdražje, predvsem kadar opravljam terenske obveznosti, ostalim članom moje družine, tj. mami Zdenki, sestri Marjetki, tastu Jožetu, tašči Mileni in ostalim.

Zahvaljujem se predavatelju Draganu Gogiću, mag. inž. metal. in mater., za strokovno predavanje pri vseh predmetih v obeh študijskih letih ter potrpljenje in strokovno svetovanje ob mentorskih obveznostih med pripravo diplomskega dela.

Zahvala gre tudi Alessandru Sartorju, mentorju v podjetju in prav tako direktorju podjetja Turbimaq Europe, ter ostalim sodelavcem tako v Evropi kot v Braziliji, saj so pripomogli k uresničitvi mojih študijskih ciljev in pripravi diplomskega dela.

POVZETEK

Podjetja, ki delujejo v energetskega segmentu proizvodnje električne energije in koriščenja termalne energije, se usmerjajo v zagotavljanje najvišje možne učinkovitosti in izkoristkov vložene energije. Borijo se za razvijanje naprav, ki imajo najboljši mogoč izkoristek, pri čemer se konstrukcijsko razvijajo nove in nove komponente. Posledično je doseganje večjega izkoristka vložene energije pri prenosu termalne energije v mehansko; v tem diplomskem delu je to tudi jedro ugotovitev. Posledično mehanska energija postane gonilo za generator električne energije kot produkt.

V diplomskem delu bo predstavljena teorija izkoriščanja termalne energije v korist uporabe vodne pare kot medija, ki je gonilo parne turbine in spremembe v mehansko energijo. Bistvo naloge je predstavitev projekta, izvedenega v obratu celuloze v Italiji, pri čemer sem deloval kot projektni vodja dobavitelja turbo-generatorskega postrojenja. V celoti je turbo-generatorska oprema del kombiniranega cikla proizvodnje električne energije, pri čemer je naročnik zamenjal tudi plinsko turbino, katere izpušni sistem se uporabi kot proizvajalec vodne pare z uporabo toplotnega izmenjevalnega sistema za pogon parne turbine in s tem doseže višji izkoristek celotne elektrarne. Oprema, ki je bila implementirana v proizvodni obrat, zajema turbo-generatorsko postrojenje in kot gonilo uporablja parno turbino tipa reakcijska ali akcijska. Reakcijske turbine uporabljajo tehnologijo statorskih šob za prenos sile vrtenja na rotorski del turbine. Zaradi visokih obratov rotorja je konstrukcija izdelana v obliki bobna tako, da je zadoščeno zahtevnim mejnim vrednostim opletanja rotorja pri hitrosti več kot 10.000 obratov na minuto. Električni generator ima nazivno hitrost obratov 1.500 na minuto. V ta namen se uporabi gonilo, ki z zelo majhnimi izgubami prenese moment in moč iz gredi parne turbine na gred elektro generatorja. Izvedba nadgradnje turbo-generatorskega postrojenja naročniku zagotavlja večji izkoristek vložene energije in posledično večjo vrednost končnega produkta, kar je v našem primeru električna energija za napajanje energetske potratne opreme v proizvodnem obratu papirnice oz. celuloze, pri čemer se izkoristi tako električna energija kot vodna para postrojenja. Izhodna vodna para iz turbine ima tlak v višino 4.0 bara in se uporablja v nadaljnjem (Tomšič, 2010) procesu obrata pri izdelavi končnega proizvoda papirja.

Ključne besede: *izkoristek termalne energije, projektna učinkovitost, vodenje, priprava, konstrukcijska dokumentacija.*

ABSTRACT

Title of thesis: Replacement of less efficient impulse type steam turbine with a reaction type to increase the efficiency of the turbo-generator plant

Companies that operate in the energy segment of electricity production and thermal energy use are focused on ensuring the highest possible efficiency and benefits of invested energy. Companies are fighting to develop devices that have the best possible efficiency, while new and new components are being developed. As a result, the achievement of greater utilization of the invested energy in the transfer of thermal energy to mechanical energy is also the core of the findings in the given diploma thesis. As a result, mechanical energy becomes the driver for the electrical generator and electricity as a product.

The thesis will present the theory of the utilization of thermal energy in favor of the use of water steam as a medium that drives steam turbines and transformation into mechanical energy. The essence of the assignment is the presentation of a project carried out in a pulp mill in Italy, where I worked as a project manager for a supplier of a turbo generator plant equipment. In its entirety, the turbo generator equipment is part of the combined cycle of power generation, whereby the client also replaced the gas turbine. The equipment that was implemented in the production plant includes a turbo-generator plant and uses a reaction type steam turbine as a drive. Reaction turbines use stator nozzle technology to transfer the rotational force to the rotor part of the turbine. Due to the high revolutions of the rotor, the construction is made in the form of a drum in such a way that the demanding limit values of rotor entanglement at speeds over 10,000 revolutions per minute are met. The electric generator has a rated speed of 1,500 revolutions per minute, and for this purpose a gear is used, which transfers torque and power from the steam turbine shaft to the electric generator shaft with very low losses. The implementation of the upgrade of the turbo generator plant provides the client with a greater utilization of the energy invested and, as a result, a greater value of the final product, which in our case is electricity for powering energy-consuming equipment in the production plant of the paper mill, using both electricity and water steam of the plant. The output steam from the turbine has a pressure of 4.0 bara and is used in the further process of the plant in the production of the final paper product.

Keywords: *thermal energy efficiency, project efficiency, management, preparation, construction documentation*

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	6
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	7
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	9
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	9
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	10
2	PREDSTAVITEV PODJETJA TURBIMAQ EUROPE	11
2.1	OPIS PROIZVODOV PODJETJA	13
2.2	PODROČJA PROIZVODNIH SEKTORJEV, KJER SE UPORABLJA PROIZVOD PODJETJA	13
2.3	ZGODOVINA PODJETJA	14
2.4	ORGANIZACIJSKA SHEMA PODJETJA TURBIMAQ EUROPE	16
2.5	TRŽNI CILJI PODJETJA TURBIMAQ EUROPE	16
3	TEHNOLOŠKA PREDSTAVITEV IMPULZNE IN REAKCIJSKE PARNE TURBINE TER PROCESOV	18
3.1	POGONI NA VODNO PARO IN ZGODOVINA RAZVOJA	18
3.2	SESTAVA PARNE TURBINE	19
3.3	UPORABA PARNIH TURBIN	26
3.4	IMPULZNE PARNE TURBINE	29
3.5	REAKCIJSKE PARNE TURBINE	32
3.6	PROTITLAČNE PARNE TURBINE	33
3.7	STABILNE IN REGULIRANE EKSTRAKCIJSKE PARNE TURBINE	34
3.8	PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE S POGONOM PARNE TURBINE GENERATORJA	35
3.9	KOMBINIRAN CIKEL PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE	35
3.10	PARNI KROŽNI PROCES	37
3.11	UČINKOVITOST PARNIH TURBIN	37
4	PREDSTAVITEV REAKCIJSKE TURBINE RT400, UPORABLJENE V PROJEKTU	42
4.1	TEHNIČNI PODATKI	42
4.2	KONSTRUKCIJSKI PODATKI	45
4.3	UČINKOVITOST TURBO-GENERATORSKEGA POSTROJENJA	47
4.4	UPORABA PARNE TURBINE	52
5	IZVEDBA PROJEKTA MENJAVE MANJ UČINKOVITE PARNE TURBINE TIPA IMPULZNE S TIPOM REAKCIJSKA ZA POVEČANJE UČINKOVITOSTI TURBO-GENERATORSKEGA POSTROJENJA	54
5.1	PREDSTAVITEV OBSTOJEČEGA POSTROJENJA	54

5.2	PREDSTAVITEV OPREME MENJAVE POSTROJENJA.....	58
5.3	FUNKCIONALNOST TURBO-GENERATORSKEGA POSTROJENJA	61
5.4	ČASOVNO NAČRTOVANJA PROJEKTA	65
5.5	IZVEDBA DEMONTAŽNIH IN MONTAŽNIH DEL NA LOKACIJI	67
5.6	IZVEDBA DEL ZA PRILAGODITEV NOVE OPREME	69
5.7	KONČNO IZRAVNAVANJE OPREME	74
5.8	ZAGON POSTROJENJA	76
5.9	FUNKCIONALNI TEST POSTROJENJA IN PREVZEM	79
5.10	IZJAVA O SKLADNOSTI	82
6	KROVNA TEMA: VODENJE STROKOVNEGA PROJEKTA IZ STROJNIŠTVA	
	83	
7	SKLEP	85
8	VIRI, LITERATURA.....	87

KAZALO SLIK

SLIKA 1:	SKUPINA ILMED IN PRIKAZ DELOVANJA PODJETJA V SKUPINI	11
SLIKA 2:	ČASOVNICA PODJETJA	12
SLIKA 3:	ORGANIZACIJSKA SHEMA PODJETJA TURBIMQ EUROPE	16
SLIKA 4:	STEAM TURBINE OSNOVNI PRINCIP	19
SLIKA 5:	OHIŠJE PARNE TURBINE NA OBDELOVALNEM STROJU	20
SLIKA 6:	ROTOR	21
SLIKA 7:	POROČILO BALANSIRANJA ROTORJA	21
SLIKA 8:	PRIKAZ MONTIRANEGA DRSNEGA LEŽAJA NA OHIŠJE IN GRED	22
SLIKA 9:	PRIKAZ DELOVANJA IN SESTAVE LABIRINTNIH TESNIL	23
SLIKA 10:	PRIKAZ ZOBNIKA ZA SLEDENJE HITROSTI GREDI IN MEHANSKEGA REGULATORJA.....	24
SLIKA 11:	PRIKAZ ZATIČA ZA PRISILNO ZAUSTAVITEV PARNE TURBINE	25
SLIKA 12:	PRIKAZ PRITRJE NE DIAPHRAGME NA OHIŠJE PARNE TURBINE	25
SLIKA 13:	PRIKAZ TIPA STOPNJE REAKCIJSKE IN IMPULZE PARNE TURBINE	27
SLIKA 14:	PRIKAZ PREHODA TLAKA VODNE PARE ČEZ STOPNJO REAKCIJSKE IN IMPULZE PARNE TURBINE	29
SLIKA 15:	SINGLE STAGE IMPULS TURBINE.....	31
SLIKA 16:	MULTI STAGE IMPULS TURBINE.....	31
SLIKA 17:	MULTI STAGE REACTION TURBINE	33
SLIKA 18:	EKSTRAKCIJA PARE PRI PROCESU DELOVANJA PARNE TURBINE	34
SLIKA 19:	KOMBINIRAN CIKEL PLINSKE IN PARNE TURBINE ELEKTRARNE.....	36
SLIKA 20:	MOLLIEREV DIAGRAM	39
SLIKA 21:	MOLLIEREV DIAGRAM	41
SLIKA 22:	PRIKAZ PROIZVEDENE ENERGIJE STAREGA IN NOVEGA POSTROJENJA	47
SLIKA 23:	PRIKAZ VSTOPNIH IN IZSTOPNIH VELIČIN POSTROJENJA	49

SLIKA 24: SHEMATSKI PRIKAZ KOMBINIRANEGA CIKLA TOVARNE	52
SLIKA 25: PARNA TURBINA RT400 NA PODESTU	53
SLIKA 26: OBSTOJEČA OPREMA PREDMET PREDELAVE	54
SLIKA 27: OBSTOJEČA PARNA TURBINA IN GONILO	55
SLIKA 28: PANEL INŠTRUMENTOV IN ELEKTRO OMARA ZA ELEKTRONSKO ZAŠČITNO OPREMO	56
SLIKA 29: ELEKTRO OMARA OBSTOJEČEGA POSTROJENJA V NADZORNI SOBI	57
SLIKA 30: OBSTOJEČI OLJNI MAZALNI SISTEM	57
SLIKA 31: NOVO GLAVNO POSTROJENJE	60
SLIKA 32: FUNKCIONALNA SHEMA VODNE PARE	62
SLIKA 33: FUNKCIONALNA SHEMA ZAŠČITNIH SIGNALOV	63
SLIKA 34: FUNKCIONALNA SHEMA IN ODČITAVANJE SIGNALOV NA HMI	63
SLIKA 35: FUNKCIONALNA SHEMA OLJNEGA SISTEMA	64
SLIKA 36: ČASOVNI NAČRT PROJEKTA	66
SLIKA 37: DVIG OPREME IZ MONTAŽNEGA PROSTORA	67
SLIKA 38: NAČRT MONTAŽE GLAVNIH ELEMENTOV IN PRITRDNITVE NA PODLAGO	68
SLIKA 39: VARILNI POSTOPEK ZA INOX CEVI	70
SLIKA 40: STANJE CEVI MED PREMONTAŽO	71
SLIKA 41: STANJE CEVI PO PRANJU IN FINALNI MONTAŽI	71
SLIKA 42: TERMODINAMIČNE RAZTEZNOSTI NA PRIROBNICI TURBINE	72
SLIKA 43: TERMODINAMIČNE RAZTEZNOSTI NA VHODNI CEVARIJI	73
SLIKA 44: TERMIČNA OBDELAVA VARJENE CEVI	73
SLIKA 45: CERTIFIKAT TERMIČNE OBDELAVE CEVI	74
SLIKA 46: CERTIFIKAT IZRAVNAVANJA OPREME	75
SLIKA 47: PRIKAZ SPOJK GREDI OPREME	76
SLIKA 48: PRIKAZ PRIPRAVE ZA PREPIHOVANJE CEVI VODNE PARE	78
SLIKA 49: TABELA PRIKAZA DEJANSKE UČINKOVITOSTI POSTROJENJA IN VHODNE PODATKE	81
SLIKA 50: PRIKAZ ELEKTRO OMARE V TESTNEM PROSTORU	82

KAZALO TABEL

TABELA 1: REFERENČNI SEZNAM PODJETJA TURBIMAQ OD LETA 2020	15
TABELA 2: PARAMETRI DELOVANJA PARNE TURBINE	43
TABELA 3: TEHNIČNI PODATKI TURBINE RT400	44
TABELA 4: IZBIRA GLAVNIH MATERIALOV KOMONENT TURBINE RT400	46
TABELA 5: PRIKAZ VHODNIH VELIČIN POSTROJENJA IN IZRAČUNANA UČINKOVITOST	48
TABELA 6: DIMENZIJE IN TEŽE GLAVNIH MONTAŽNIH ELEMENTOV	69
TABELA 7: TABELA PRIKAŽUJE REZULTATE PRVEGA TESTA	79
TABELA 8: TABELA PRIKAŽUJE REZULTATE TESTA PRED KONČNIM SKLEPOM	80

1. UVOD

Strojegradnja je temelj mehanske industrije in končni rezultat napredka industrializacije v svetu. Nahajamo se v industrijski revoluciji številka 4.0, v katero sem s svojimi službenimi obveznostmi neposredno vpleten. Moje službovanje v strojegradnji se je začelo pred 20 let. Moje znanje in kompetence je zaznamoval prehod iz industrijske revolucije 3.0 v 4.0. V letu 2003 sem se s svojim prvim službovanjem ukvarjal z risanjem 2D-tehničnih načrtov strojnih inštalacij v programu Autocad 2000. Z letom 2005 sem se zaposlil kot tehnolog in z leti nadgradil svoje zadolžitve z zadolžitvami produktne vodje in vodje testiranj hidravličnih sistemov pomožnih strojev v Oil & Gas industriji v podjetju Flenco, d. o. o. Po 14 letih sem zamenjal delovno mesto in se aktivno srečal s projektnim vodenjem v podjetju Ledinek Engineering, d. o. o. Po dveh letih sem sprejel nov službeni izziv v podjetju Turbimaq Europe.

Predmet diplomskega dela je predstavitev zamenjave obstoječega turbo-generatorskega postrojenja, ki je del tovarne papirja, pri čem se za stroje za izdelavo papirja uporablja vodna para. Posledično je v tovarniškem kompleksu implementiran kombiniran sistem plinskih in parnih turbin za pridobitev električne energije. Obstoječa oprema je bila zagnana v osemdesetih letih prejšnjega stoletja in je bila potrebna nadgradnje oz. zamenjave za doseganje večje učinkovitosti in izkoristka vhodne energije.

Projekt kot tak v realni sliki prikazuje implementiranje industrijske revolucije 4.0, saj modernizirana oprema sestoji iz osnovnih glavnih elementov pogonskih strojev in gnanih strojev, tudi iz nadgradnje digitalizacijskega sistema nadzora celotnega kombiniranega postrojenja tovarne.

Lastne izkušnje kažejo očitni trend v vseh tehnologijah strojegradnje v smeri digitalizacije tako proizvodnih procesov, nadzornih procesov in izvedbenih procesov z namenom doseganja večje učinkovitosti in zanesljivosti. Pred dvajsetimi leti, ob začetku mojega službovanja v strojegradnji, je bil poudarek mojih zadolžitev na poznavanju mehanskih tehnologij. Predvsem v zadnjih pet do deset let se zadolžitve in zahteve po mojem spoznavanju in znanju elektro opreme in digitalizacije sistemov sukcesivno povečuje, zato je moje delo kot projektnega vodja v strojegradnji sestavljeno iz opravil zadolžitve delovnega mesta kot neprestanega učenja in spoznavanja novih tehnologij.

Izzivi našega časa projektnega vodenja je vedno širši obseg tehnološkega znanja, komunikacijskega znanja in vodstvenega znanja, saj ima prav vsak projekt določeno časovnico

izvedbe in le zagotavljanje izvedbe projektov v določeni časovnici podjetjem zagotavlja renome in rast na tržišču.

V nadaljevanju bo predstavljen projekt, izveden v letu 2022, ter obveznosti in zadolžitve projektnega vodenja. Delno bodo opisane komplikacije pri izvedbi projekta in rešitve le-teh.

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Kot projektni vodja v podjetju Turbimaq Europe, d. o. o., sem bil zaposlen štiri mesece pred pridobitvijo projekta, ki je predmet tega diplomskega dela. Časovnica projekta od naročila do izvedbe je bila pogodbeno zastavljena v trajanju 11 mesecev od naročila do zagona novega turbo-generatorskega postrojenja. Čeprav z mnogimi izkušnjami iz preteklosti, saj sem služboval v podjetju Flenco, d. o. o., ki izdeluje Oil and Gas auxiliary opremo, kot produktni vodja, v podjetju Ledinek Engineering pa kot projektni vodja izvedbe tehnoloških linij za obdelavo masivnega lesa, je bil projekt izvedbe zamenjave kompletnega turbo-generatorskega postrojenja vendarle nova zahtevna naloga zame kot projektnega vodjo. Zahtevnost se je nanašala predvsem na organizacijsko shemo podjetja in nepoznavanja tehnologije delovanja opreme; pri tem izpostavljam regulacijsko in kontrolno opremo postrojenja – elektro inženirski del. Podjetje Turbimaq Europe, d. o. o., je nastalo kot podružnica podjetja Turbimaq Brasil, ki se ukvarja s proizvodnjo parnih turbin od leta 1976. Vendar lastniška struktura podjetja ni v neposredni povezavi s podjetjem Turbimaq Turbinas e Maquinas Brasil, ampak le nosi ime produkta. Lastništvo podjetja Turbimaq Europe, d. o. o., je del skupine Ilmed Spa, ki je registrirana v Italiji.

Podjetje Turbimaq Europe se ukvarja s prodajo parnih turbin izdelanih v Braziliji v podjetju Turbimaq Turbinas e Maquinas, svojo dejavnost pa dopolnjuje s ponujanjem kompletnih rešitev turbo-generatorskih postrojenj, pri čemer je obseg ponujene opreme odvisen od povpraševanja in zahtevnika stranke. Prav tako v sklop ponudbe spadajo tudi parne turbine za mehanski pogon črpalk, kompresorjev in druge mehansko gnane opreme.

Za orientacijo: podjetje za ponujanje turbo-generatorskega postrojenja za proizvodnjo električne energije, pri čemer se izkorišča termalna energija, zajema naslednjo opremo in storitve: konstrukcijska izdelava sestavnih načrtov, dobava parne turbine, dobava gonil, dobava generatorja, dobava centralnega mazalnega sistema, dobava elektro regulacijske in zaščitne opreme in izvedbo montažnih del.

Specifični projekt, predstavljen v diplomskem delu, nosi naslov TOSCOLANO CTE. TURN KEY INSTALLATION AND START-UP OF NEW STEAM TURBINE MODEL RT400, ITS GENERATOR AND ALL AUXILIARIES; v nadaljevanju naloge bo uporabljena skrajšana verzija BURGO TOSCOLANO.

Področje raziskovanja je usmerjeno k usklajenemu pristopu izvedbe projekta in zagotavljanju časovnice projekta. Najzahtevnejši del je bil zagotovitev pravočasnih izdelav opreme, ki je bila vgrajena v projektu. Posebna pozornost je na parni turbini, katere izvedba je reakcijska oz. akcijska turbina in je v nadaljevanju podrobneje opisana, pri čemer je podana tudi razlika med impulzno in reakcijsko turbino. Podjetje Turbimaq Turbinas e Maquinas je v omenjenem projektu prvič gradilo in razvijalo parno turbino reakcijskega delovanja, za kar je bilo na razpolago le 10 mesecev od naročila. Sprotno sledenje in informiranje v oddelku razvoja in konstruiranja podjetja je bilo ključno za zagotavljanje izvedbe v roku projektne časovnice. V nadaljevanju po zagonu opreme je bila dodatna zahtevnost dokazovanje doseganja dejanskega izkoristka parne turbine po zagonu in poiskati variacije, ki so vplivale na dobljene podatke in njihovo interpretacijo v primerjavi s teoretičnimi predpostavkami izkoristka.

Pomen dokazovanja dejanske učinkovitosti parne turbine se je izkazal po uspešni umestitvi in zagonu opreme med prizadevanji predaje in prevzemnega testa opreme stranki.

Razsežnosti problema so bile na začetku cikla testiranja velike, zato je bila potrebna naknadna celostna analiza elektrarne za ugotovitev in argumentiranje pridobljenih podatkov. Na to je vplivala predvsem oprema, ki je bila za projekt v izvedbi adaptirana in le delno prilagojena novim dimenzijam postrojenja ob menjavi stare impulzne turbine z novo reakcijsko parno turbino.

Časovnica projekta zaradi svoje kratkoročnosti je bila izziv, ki smo ga sprejeli in ne nazadnje tudi uspešno izvedli. Pomembno dejstvo je, da so bila za doseganje časovnih rokov potrebna prilagajanja, med drugim sprememba izvedbe transporta parne turbine iz Brazilije iz ladijskega v letalski promet. Letalski transport takšnega elementa je bilo novo področje organizacije in opredelitev stroškov podjetja ter ne nazadnje odločitev prioritete finančne sheme izvedbe ali časovnice in zadovoljstvo stranke.

Turbo-generatorsko postrojenje je izvedlo prvi zagon pred določeno projektno časovnico in s tem je podjetju uspelo postaviti znamko Turbimaq na evropski zemljevid proizvajalcev parnih turbin. Podjetje je dokazalo, da lahko konkurira uveljavljenim dobaviteljem v evropskem

prostoru, kot so Franco Tossi, Depretto, Siemens, Triveni, TGM in TTK, ter jih ne nazadnje tudi prehitijo v učinkovitosti časovne izvedbe projektov.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Namen in cilj na področju projektnega vodenja je izvedba projekta v pravočasnem okvirju projekta ter zagotovitev navzkrižne komunikacije med različnimi dobavitelji opreme, pri čemer projektni vodja ponudnika opreme končni stranki opravlja funkcijo vozlišča. Pri tem je izvedba pravočasnega transporta opreme, ki se delno izdeluje v Južni Ameriki, na mesto montaže ključni vmesni korak do uspešne izvedbe.

V diplomskem delu prikazujem in obravnavam pomembnost in veljavnost naslednjih hipotez:

- H1: Uporaba parne turbine tipa reakcijska omogoča večji izkoristek vhodnega medija pri pretvorbi v mehansko energijo kot parna turbina tipa impulzna.
- H2: Investicija v nadgradnjo ustrezno delujoče opreme se za investitorja obrestuje, če sta učinkovitost in izkoristek večja.
- H3: Preventivna kontrola dejanskega stanja mesta montaže minimizira možnosti zapletov in dodatnih stroškov pri izvedbi zamenjave opreme
- H4: Učinkovitost moderniziranega postrojenja procesa proizvodnje električne energije je bila dosežena. Dokaz je višja proizvodnja električne energije ob enaki uporabi vhodnega medija.

1.3 Predpostavke in omejitve

Pridobljeni podatki, raziskani in zabeleženi v diplomskem delu, bodo lahko podjetju zagotovili povečano zanesljivost izvedbo projektov novih postrojenj, imenovanih zelena trasa ali montaže oz. zamenjave odslužene opreme z novo.

V sistemu podjetja je trenutno več kot 50 aktivnih projektov v različnih fazah ponudb in dogovarjanj za izvedbo, pri čemer je glavnina turbo-generatorskih postrojenj z različno opremo.

Vsak od teh 50 aktivnih projektov zajema različno opremo po tehničnih karakteristikah in obsegu.

Predpostavke in omejitve se nanašajo na postopek pisanja projektnega dela. Omejitve so lahko: podatki so poslovna skrivnost organizacije, pomanjkanje literature, nepripravljenost zaposlenih v organizaciji za sodelovanje, na razpolago so podatki samo za določeno obdobje.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V diplomskem delu se za preučevanje problematike uporabljajo različne metode, in sicer:

- metoda preučevanja ponudb in tehnične dokumentacije v fazi ponudb opreme podjetja,
- metoda internega raziskovanja s pomočjo internetne uporabe in zunanje literature,
- metoda projektnega dela med dobavitelji,
- po metodi lastnih izkušenj v strojegradnji s skoraj 20 letnimi izkušnjami,
- metoda komunikacije s stranko po sklenitvi pogodbe za izvedbo projekta.

2 PREDSTAVITEV PODJETJA TURBIMAQ EUROPE

Podjetje Turbimaq Europe, d. o. o., je nastalo leta 2019 kot strateški partner podjetja Turbimaq Turbinas e Maquinas iz Brazilije. Lastniško je del skupine Ilmed s sedežem v Torinu v Italiji. Namen podjetja in misija ob ustanovitvi je bil učinkovito zadovoljevanje potreb strank s ponudbo opreme z ustrezno tehnologijo za pričakovani rezultat. Inženiring in proizvodnja projektov zagotavljata najnovejšo tehnologijo in verodostojnost naših izdelkov. Jedro ponudbe so parne turbine, izdelane v podjetju Turbimaq Turbinas e Maquinas, ki je v družinski lasti in z inovacijami in razvojem nadgrajuje znanje in obliko ter delovanje svojih proizvodov. Podjetje Turbimaq Turbinas e Maquinas je bilo ustanovljeno leta 1976. Parne turbine na voljo v programu podjetja so enostopenjske impulzne, večstopenjske impulzne, reakcijske turbine in impulzne turbine po izvedbi standarda API 611 in API 612 za delovanje v eksplozivno nevarnem okolju. Pri tem je treba omeniti, da zagotavljajo delovanje pod pogoji standarda API 611 in 612 in da jih izdeluje le peščica podjetij na svetu.

Podjetje Turbimaq Europe dodatno izvaja storitve vzdrževanja in preuredite turbopostrojenj in komponente turbopostrojenj. Ekipa visoko usposobljenih tehnikov in inženirjev izvaja vzdrževanje, zagon, remonte in servisne dejavnosti za: portfelj parnih turbin Turbimaq, druge parne turbine OEM in druge komponente turbostrojev v regiji EMEA.

Podjetje s svojim poslovnim načrtom prodira v evropski prostor ponudnikov turbo postrojenj in se v trenutni situaciji pomanjkljivosti energetskih virov nadeja hitrega širjenja na tržišču, saj v ta namen države promovirajo izkoristek vsakega vira, ki nam je na razpolago.



Slika 1: Skupina Ilmed in prikaz delovanja podjetja v skupini.

Vir: (Turbimaq Europe)

Primarno podjetje Turbimaq iz Brazilije je svoj proizvodni proces in delovanje certificiralo skladno s standardom ISO 9001 v letu 2008 in uspešno opravlja redne preglede s strani organa za certificiranje Bureau Veritas Certification.



Slika 2: Časovnica podjetja

Vir: (Turbimaq Turbinas e Maquinas)

2.1 Opis proizvodov podjetja

Podjetje Turbimaq Europe, d. o. o., kot podružnica podjetja Turbimaq Turbinas e Maquinas proizvaja lastne produkte, česar glavni proizvod so parne turbine. Dodatno podjetje razvija in gradi pomožne sisteme za delovanje turbo-generatorskega postrojenja, kot so oljni mazalni sistemi, nosilne konstrukcije, elektro oprema za regulacijo in kontrolo delovanja celotnega sklopa turbo-generatorskega postrojenja.

Glavni proizvod parne turbine se izdeluje pod lastno znamko iz lastnega razvoja od leta 1976. Tipi in območje moči parnih turbin so razdeljeni na več območij, in sicer:

- Večstopenjske turbine (MULTIPLE STAGE TURBINES):
 1. ME Series (Counterpressure),
 2. Mega Series (Counterpressure),
 3. Mega Series (Condensing).
- Enostopenjske turbine (SINGLE STAGE TURBINES):
 1. SE Series (Counterpressure),
 2. RC Series (Counterpressure).
- API turbine (API TURBINES):
 1. SE Series (Counterpressure),
 2. Mega Series (Counterpressure),
 3. Mega Series (Condensing).
- Večstopenjske reaction turbine (MULTIPLE REACTION TYPE TURBINES):
 1. RT Series (Counterpressure),
 2. RT Series (Condensing).

2.2 Področja proizvodnih sektorjev, kjer se uporablja proizvod podjetja

Izhodišče za prisotnost in identifikacija proizvodnih sektorjev je glavni proizvod parna turbina, katera namembnost je povsod, kjer se viri energije pretvorijo v termalno energijo in se proizvede vodna para.

Proizvodnji sektorji so:

- živilska industrija,
- biomasa,
- elektro industrija,
- lesna industrija,
- oil & gas industrija,
- papirna industrija,
- kovinarska industrija,
- kemijska industrija,
- waste to energy industrija (odpadki v energijo).

2.3 Zgodovina podjetja

Podjetje Turbimaq Europe in Turbimaq Brasil je v svoji zgodovini na globalnem trgu prodalo in proizvedlo 758 parnih turbin. Podjetje Turbimaq Europe kot podružnica podjetja v Evropi je od svoje ustanovitve uspešno prodalo skupaj 11 parnih turbin, od katerih jih je 9 na mehanski pogon in so bile prodane kot samostojni element, ter eno turbino, ki je v diplomskem delu predstavljena kot turbo-generatorski sklop, in eno kot turbopump sklop. V tabeli 1 je prikazana referenčna tabela, kar prikazuje prodane parne turbine podjetja Turbimaq. V referenčni tabeli so navedeni zaporedna oz. tovarniška številka parne turbine, ime naročnika, država naročnika, nazivni vhodni pritisk vodne pare, nazivna vhodna temperatura vodne pare, tip parne turbine, gnana oprema, skladnost z API-standardom, nazivna moč parne turbine, nazivna hitrost vrtiljajev gredi parne turbine in datum naročila s strani končnega kupca.

Tabela 1: Referenčni seznam podjetja Turbimaq od leta 2020

STEAM TURBINE REFERENCE LIST

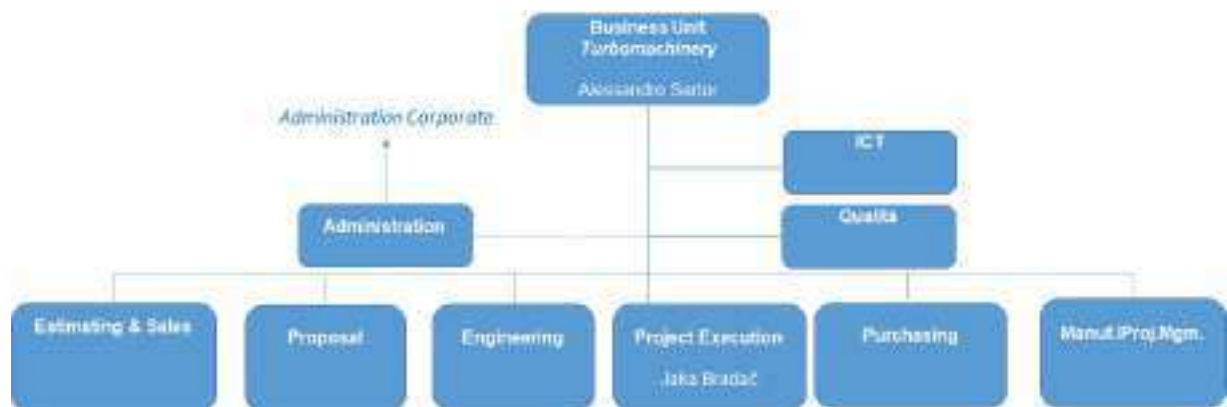
N°	CUSTOMER	COUNTRY OF INSTALLATION	Inlet Pressure (barG)	Inlet Temp. (°C)	TURBINE SIZE	DRIVEN EQUIPMENT	API COMPLIANT	POWER	SPEED (rpm)	PROJECT DATE
758	TURBIMAQ EUROPA - GOLDEN UNION	MIDDLE EAST	42,18	371	MEGA 400	PUMP	YES - 611	2408 kW	5.708	oct/22
757	MALOSSO BIOENERGIA	BRAZIL	21	300	700 ME	S-REIDER	NO	1250 HP	4.600	oct/22
756	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	BRAZIL	17,2	288	SE 350	BOILER PUMP	YES - 611	4,5 kW	2.950	oct/22
755	PRIMO TEDESCO	BRAZIL	43	425	TB-H150	OIL PUMP	NO	4 HP	2.000	jul-22
754	PRIMO TEDESCO	BRAZIL	43	425	MEGA 40000	GENERATOR	NO	3000 kW	8.000	jul-22
753	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	17,2	288	SE 350	BOILER PUMP	NO	7,5 kW	2.950	jun-22
752	OLEOPLAN - TOMÉ AQU	BRAZIL	24	350	TB-H150	OIL PUMP	NO	2 HP	2.000	may/22
751	OLEOPLAN - TOMÉ AQU	BRAZIL	24	350	RT 400 ECO	GENERATOR	NO	2000 kW	10.500	may/22
750	CALDEMA - ZILOR-Quatá	BRAZIL	21	340	TB-H150	OIL PUMP	NO	3 HP	2.000	may/22
749	CALDEMA - ZILOR-Quatá	BRAZIL	21	340	RC 850	PUMP	NO	1900 HP	3.000	may/22
748	CALDEMA - AROBERA	BRAZIL	21	300	TB-H150	OIL PUMP	NO	3 HP	2.000	may/22
747	CALDEMA - AROBERA	BRAZIL	21	300	RC 850	PUMP	NO	2100 HP	3.580	may/22
746	BELEMBIOENERGIA - Unidade Tailândia	BRAZIL	15	202	MEGA 400	GENERATOR	NO	840 kW	8.000	apr/22
745	FUMACENSE ALIMENTOS	BRAZIL	22	330	TB-H150	OIL PUMP	NO	2 HP	2.000	apr/22
744	FUMACENSE ALIMENTOS	BRAZIL	22	330	MEGA 400 CO	GENERATOR	NO	2620 kW	8.000	apr/22
743	CALDEMA - JALLES MACHADO	BRAZIL	21	300	SE 650	CENTRIFUGAL PUMP	NO	1400 HP	3.570	jan-22
742	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	11,6	300	SE 650 HT	CENTRIFUGAL PUMP	YES - 611	132 kW	1.300	jan-22
741	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	11,6	300	SE 650 HT	CENTRIFUGAL PUMP	YES - 611	132 kW	1.300	jan-22
740	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	11,6	300	SE 500 HT	CENTRIFUGAL PUMP	YES - 611	90 kW	1.475	jan-22
739	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	11,6	300	SE 500 HT	CENTRIFUGAL PUMP	YES - 611	90 kW	1.475	jan-22
738	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	11,6	300	SE 500 HT	CENTRIFUGAL PUMP	YES - 611	90 kW	2.950	jan-22
737	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	11,6	300	SE 500 HT	CENTRIFUGAL PUMP	YES - 611	90 kW	2.950	jan-22
736	TURBIMAQ EUROPA - TERMOMECCANICA	NGERIA	42,2	400	SE 500 HT	CENTRIFUGAL PUMP	YES - 611	380 kW	2.980	jan-22
735	ITAMARATI	BRAZIL	42	390	MEGA 600	S-REIDER	NO	6.600 HP	5.500	aug/21
734	VALE DO PONTAL	BRAZIL	21	300	SE 650	BOILER PUMP	NO	1.600 HP	3.550	aug/21
733	MADEREIRA MARACANHÁ	BRAZIL	43	450	TB-H150	OIL PUMP	NO	3 HP	2.000	may/21
732	MADEREIRA MARACANHÁ	BRAZIL	43	450	MEGA 500 ECO	GENERATOR	NO	5.650 kW	7.000	may/21
731	TURBIMAQ EUROPA - BURGO	ITALY	60	470	RT 400	GENERATOR	NO	4.620 kW	10.632	mar-21
730	VILLA GUILLERMINA (PAPELERA VUAL)	ARGENTINA	29	345	MEGA 50000	GENERATOR	NO	4.000 kW	7.000	Sep/2020
729	USINA LAGUNA	BRAZIL	4	450	MEGA 400	S-REIDER	NO	2.200 HP	8.000	Aug/2020
728	USINA LAGUNA	BRAZIL	42	450	MEGA 400	S-REIDER	NO	2.200 HP	8.000	Aug/2020
727	USINA LAGUNA	BRAZIL	42	450	MEGA 400	S-REIDER	NO	2.200 HP	8.000	Aug/2020
726	USINA LAGUNA	BRAZIL	42	450	MEGA 400	S-REIDER	NO	2.200 HP	8.000	Aug/2020
725	OIA AZUL CARBURA LA ESTRELLA	PANAMÁ	14	260	500 ME	S-REIDER	NO	3.000 HP	5.000	May/2020
724	USINA IPOJUCA	BRAZIL	21	300	MEGA 600	S-REIDER	NO	2.500 HP	6.000	apr/20
723	USINA SANTA FÉ	BRAZIL	21	300	TB-H250	OIL PUMP	NO	20 HP		jan-20
722	USINA SANTA FÉ	BRAZIL	21	300	MEGA 10000	GENERATOR	NO	10.000 kW	6.000	jan-20
721	BENDO ALIMENTOS	BRAZIL	43	440	MEGA 40000	GENERATOR	NO	2.000 kW	8.000	jan-20
720	SANTA LUZIA ALIMENTOS - ARROZ BELLEVILLE	BRAZIL	41	415	MEGA 40000	GENERATOR	NO	3.500 kW	8.000	jan-20

Vir: (Turbimaq Turbinas e Maquinas)

2.4 Organizacijska shema podjetja Turbimaq Europe

Podjetje Turbimaq Europe je mednarodno podjetje, katerega uslužbenci so kvalificirane osebe iz različnih držav. V podjetju so zaposleni ljudje iz Slovenije, Italije in Hrvaške. Sedež podjetja je v Sloveniji v Mariboru, kjer delujejo vodstvo, administracija, nabavna služba, transport, oddelek za kakovost, tehnična služba in oddelek projektnega vodenja.

Moje delovno področje je projektno vodenje oz. projektna izvedba in predstavlja samostojno pozicijo v podjetju. Namen oddelka projektnega vodenja je povezovalna zadolžitev med ostalimi oddelki podjetja pri realizaciji pridobljenih naročil, prav tako je tudi povezovalni in nadzorni organ v podjetju za sodelovanje z zunanjimi kooperanti. V našem podjetju v osnovni shemi kooperanti opravljajo dela na dobavi gnanih elementov, sestavo konstrukcijskih elementov, npr. podest postrojenja, elektro opreme in montažnih storitev na lokaciji izvedbe pri stranki. (Europe, Poslovni načrt. Interno gradivo, 2018)



Slika 3: Organizacijska shema podjetja Turbimaq Europe

Vir: (Turbimaq Europe)

2.5 Tržni cilji podjetja Turbimaq Europe

Cilji so postati pomemben dobavitelj parnih turbin za gnane rotacijske elemente v evropskem prostoru in dobavljati najučinkovitejše pogone skladne s kakovostjo.

Cilji temeljijo na:

- inovativnosti in lastnem razvoju,
- doseganju najvišje učinkovitosti produkta,
- biti enakovreden in v nekaterih segmentih celo uspešnejši od konkurence,

- pridobiti certifikat kakovosti za storitve, opravljene v Evropi, in formalno potrditi razvojne cilje podjetja,
- zadovoljiti potrebe po časovni izvedbi projektov,
- biti tehnološka podpora za kupce pri doseganju njihovih ciljev.

Podjetje Turbimaq je v letu 2022 dokazalo, da se je za vse uspešno pridobljene projekte držalo časovnih rokov in jih celo prehitelo. Odziv kupcev je bil zelo pozitiven in pohvalen. Iz teh ugotovitev bo podjetje v nadaljevanju gradilo in že dosežene cilje uporabilo kot referenco za nadaljnje uspešno udejstvovanje na tržišču.

Podjetje oziroma naveza med Turbimaq Brazil in Turbimaq Europe ima največji izziv v prenosu podatkov in komunikacije v realnem času. Cilj podjetja je, da z uporabo digitalizacijskih orodij še nadgradi odzivnost in sodelovanje v tem mednarodnem in globalnem poslovnem svetu.

3 TEHNOLOŠKA PREDSTAVITEV IMPULZNE IN REAKCIJSKE PARNE TURBINE TER PROCESOV

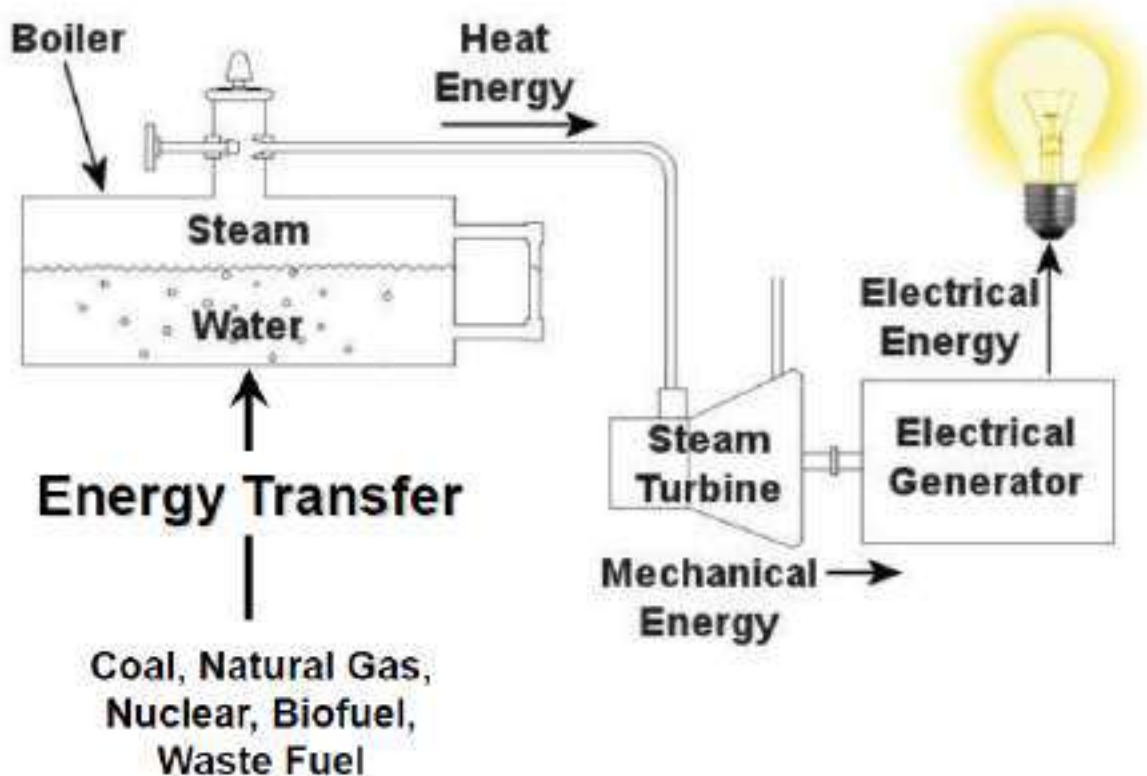
3.1 Pogoni na vodno paro in zgodovina razvoja

Pojav parne turbine lahko zasledimo v začetku 18. stoletja, ko je francoski inženir Denis Papin predlagal uporabo turbine za pogon parnega stroja. V 20. stoletju so bile parne turbine uporabljene v številnih aplikacijah, od pogona ladij in vlakov do proizvodnje električne energije v elektrarnah, katerega princip delovanja je prikazan na sliki 4. Danes se parne turbine še vedno pogosto uporabljajo pri proizvodnji električne energije in drugih industrijskih aplikacijah. Razvoj parnih turbin je stalen proces, v katerem je bilo v preteklih letih narejenih veliko napredkov in izboljšav. Ključni mejnik v razvoju parnih turbin je leto 1884, ko je Charles Parsons patentiral prvo praktično parno turbino, ki je bila uporabljena za napajanje električnega generatorja. To je pomenilo začetek široke uporabe parnih turbin v elektrarnah. V dvajsetih in tridesetih letih 20. stoletja je napredek v materialih in metalurgiji omogočil gradnjo večjih in učinkovitejših parnih turbin, kar je privedlo do povečane toplotne učinkovitosti in izhodne moči. V petdesetih in šestdesetih letih 20. stoletja so izboljšane zasnove turbin in krmilnih sistemov vodile k večji zanesljivosti in učinkovitosti parnih turbin. V sedemdesetih letih 20. stoletja je razvoj elektrarn s kombiniranim ciklom, ki uporabljajo tako plinske kot parne turbine, povzročil znatno povečanje učinkovitosti proizvodnje električne energije. V zadnjih letih so se raziskave in razvoj osredotočili na povečanje učinkovitosti in zmogljivosti parnih turbin z uporabo naprednih materialov in proizvodnih tehnik, naprednih krmilnih sistemov in inovativnih zasnov, kot so superkritične in ultra superkritične parne turbine, ki lahko delujejo pri višjih temperaturah in tlakih. Raziskave in razvoj so bili usmerjeni tudi v povečanje učinkovitosti in zmogljivosti parnih turbin z uporabo sistemov za rekuperacijo odpadne toplote, soproizvodnje in tri generacijske sisteme.

Na splošno je razvoj tehnologije parnih turbin vodila potreba po povečanju učinkovitosti in zmanjšanju stroškov ter po iskanju novih in inovativnih načinov za pridobivanje energije (Heinz Bloch, 2008).

Steam Turbine Fundamentals

Fundamentals



Slika 4: Steam turbine – osnovni princip

Vir: (internet source)

3.2 Sestava parne turbine

Načrtovanje komponent parne turbine je kompleksna naloga, saj gre za tridimenzionalno zasnovo njenih delov. Pri načrtovanju je treba upoštevati številne dejavnike, kot so toplota, tlak, sile, vibracije, število vrtljajev, učinkovitost itd. Glede na konstrukcijski del obstajajo različni sestavni deli parnih turbin, kot so rotor, gred, lopatice, ohišje, ležaji, ventili, šobe, tesnila, zagonski sistem, regulatorski sistem, ohišje itd. Tukaj se bom osredotočil na nekaj glavnih delov parne turbine.

Ohišje parne turbine:

Ohišje parne turbine je kovan element, ki se mehansko obdelava za namen montaže delov turbine. Z ohišjem so povezani regulacijski ventil oz. vstopni ventili vodne pare in zagonski ventil, ohišje sestavljajo tudi izstopni kanali pare iz turbine. Ohišje vsebuje rotor in vstopne šobe, skozi

katere se para širi in usmerja proti vrtljivim delom parne turbine. Ohišje po kovanju je prikazano na sliki 5.

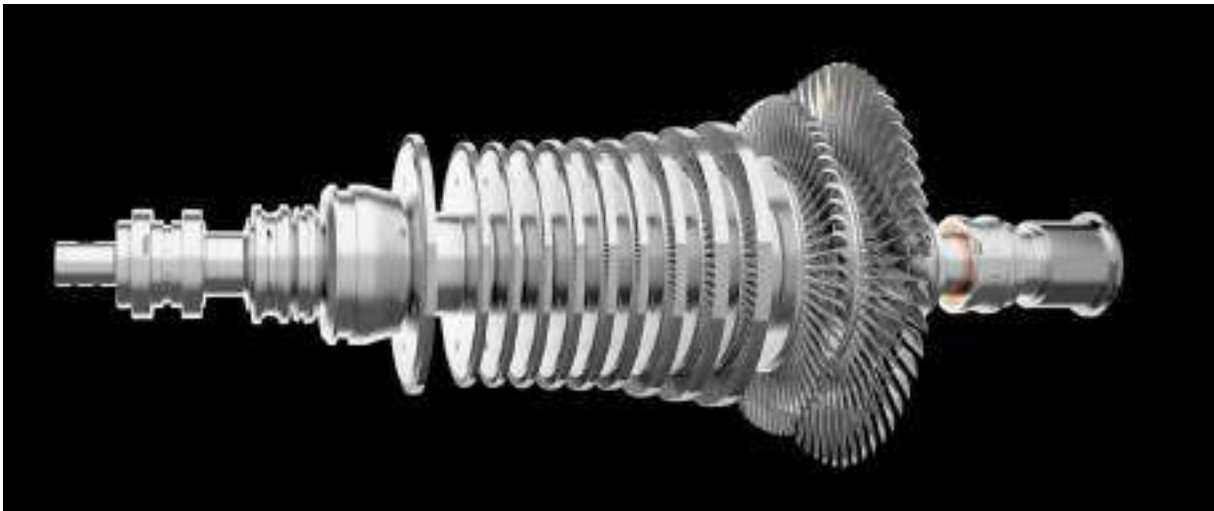


Slika 5: Ohišje parne turbine na obdelovalnem stroju

Vir: (Turbimaq)

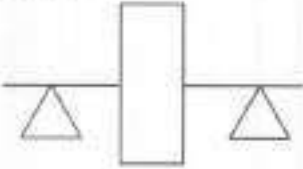
Rotor:

Sestavljen je iz sklopov gredi in diska z lopaticami. Gred je vpeta v ohišje parne turbine v ohišja ležajev. En konec gredi se uporablja za priklop na gnano črpalko ali generator. Drugi konec gredi služi regulatorju hitrosti in sistemu za preprečevanje prevelike hitrosti. Pritrditev lopatic na disk rotorja je lahko v sklopih ali posameznih lopatic, ki so pritrjene na disk rotorja v profilnem kanalu in varjenim zunanjim povezovalnim trakom, razen prvostopenjske lopatice večjih površin, ki so montirane brez povezovalnega zunanjskega traka oz. venca. Slika 6 prikazuje rotor z diskom in lopaticami. Vsak rotor se po kompletiranju montaže balansira, pri čemer se rotor montira na balansirni stroj in se z določeno hitrostjo vrti pri tem se meri oplet kompletnega rotorja ter se izvedejo popravki na balansirni izravnavi mase rotorja (gl. sliko 7, kjer je prikazano vzorčno poročilo balansiranja rotorja).



Slika 6: Rotor

Vir: (Turbimaq)

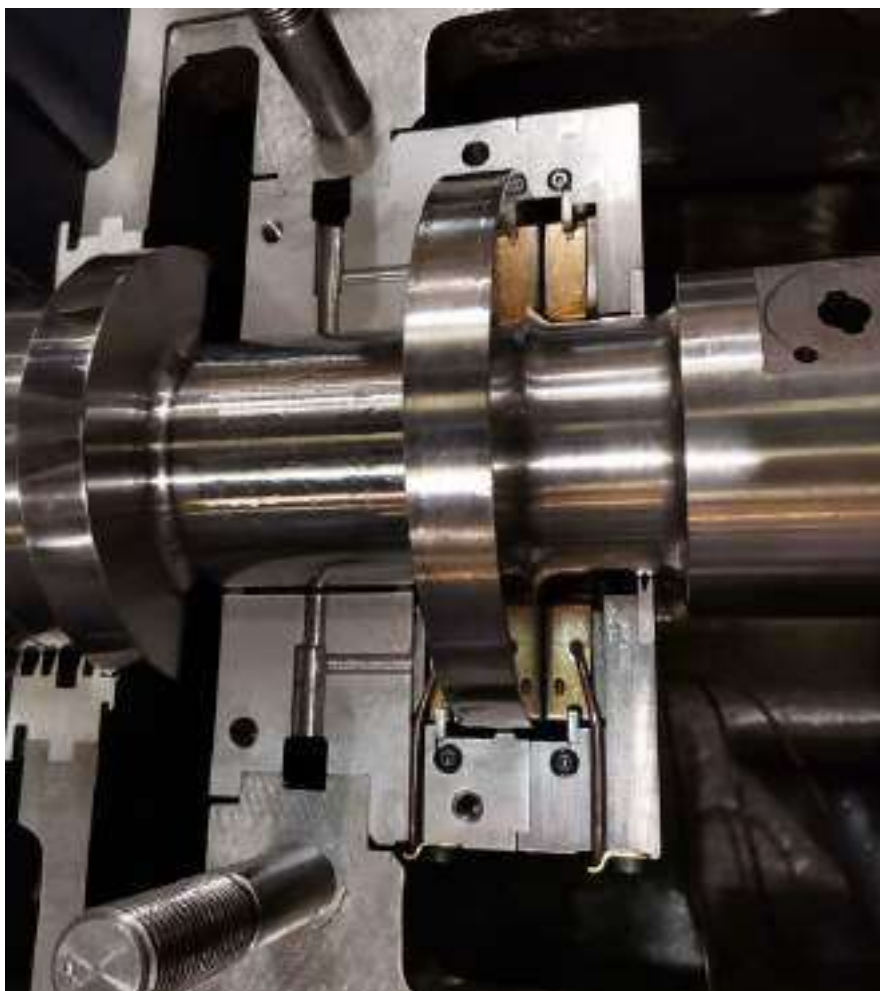
 TURBIMAQ Corporação e Indústria		CERTIFICADO DE BALANCEAMENTO / BALANÇO CENTRÍFUGO		REL. N° 906/22																		
HOFFMANN BAL - BR DATA / (m/aa) 00/07/2022, 16:48:45 TAG: 15.PC.07.21			Pág. Nr. 1 de 1																			
OP: 734/22		Grupo / (Group)		Rotor: DIREITO																		
Cliente / Customer	TERMOMECANICA	Qualidade / Quality	1.0	40																		
Identificação / Identification	ROTOR TU-SE 800 HT	Rotação de Trabalho / Working Revolutions	2000	rpm																		
Operador / Operator	DEIVID	Peso do Rotor / Rotor Weight	40.000	kg																		
R = 215 mm																						
																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">gmm</th> <th colspan="2">Plano Estático / Static Plane</th> </tr> <tr> <th>Desb. / mm</th> <th>Gravim. / Grammas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Inicial / Initial</td> <td>717</td> <td>8.6</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td>Final / Final</td> <td>715</td> <td>0.5</td> <td>gr</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Tolerância / Tolerance</td> <td>1.500</td> <td>gr</td> </tr> </tbody> </table>			gmm		Plano Estático / Static Plane		Desb. / mm	Gravim. / Grammas	Inicial / Initial	717	8.6	gr	Final / Final	715	0.5	gr	Tolerância / Tolerance		1.500	gr
gmm		Plano Estático / Static Plane																				
		Desb. / mm	Gravim. / Grammas																			
Inicial / Initial	717	8.6	gr																			
Final / Final	715	0.5	gr																			
Tolerância / Tolerance		1.500	gr																			
CONFERIDO POR CONFIRMED BY		APROVADO APPROVED																				

Slika 7: Poročilo balansiranja rotorja

Vir: (Turbimaq)

Ohišja ležajev:

Ohišja ležajev imajo namen podpornih točk gredi na ohišju parne turbine. Rotor podpira na dveh mestih, običajno na skrajnih delih gredi. Ležaji so običajno tipa drsni ležaji, ki imajo drsno površino obdelano z zlitino, imenovano whitemetal, ki se po potrebi obnovi. Ohišja ležajev so izdelana tako, da vsebujejo oljne kanale, zagotovijo sloj olja med gredjo in ležajem ter zmanjšajo trenje, ter pozicionirne tekalne ležaje, ki preprečujejo aksialni pomik gredi v ohišju parne turbine. Sestavni del ohišja ležajev so tudi kovinska tesnila, ki preprečujejo uhajanje olja navzven ter vdor vode, prahu in pare. V drsnih ležajih so pritrjena tudi temperaturna tipala tipa PT100 za nadzor temperature elementov, pri čemer se turbina v primeru večjega povišanja temperature samodejno izklopi. Na sliki 8 je prikazan montiran ležaj v ohišju parne turbine in gredjo rotorja. Levo in desno od aksialnega omejevalnika sta vidni dve tipali temperaturnih inštrumentov.

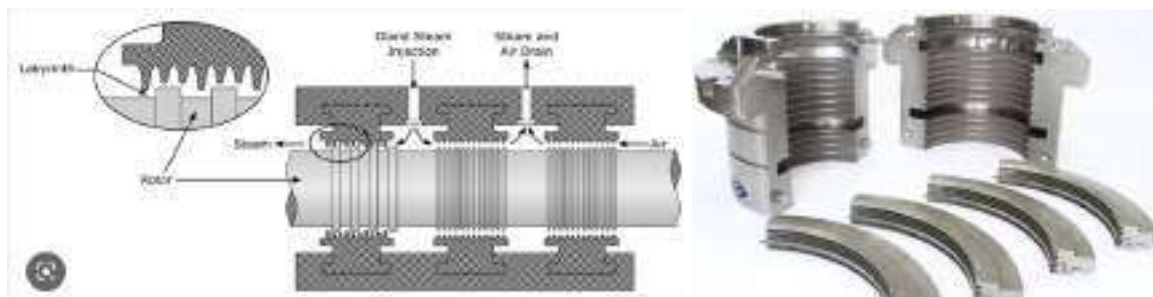


Slika 8: Prikaz montiranega drsnega ležaja na ohišje in gred

Vir: (Turbimaq)

Labirintska tesnila na gredi rotorja:

Labirintska tesnila na gredi rotorja so namenjena preprečitvi uhajanja vodne pare iz notranjega ohišja parne turbine. Za ta namen se uporabljajo vzmetno podprti segmentni oz. ogljikovi obroči, dopolnjeni z vzmetno podprtim labirintnim delom. Labirintna tesnila so prikazana na sliki 9, kjer je razvidna oblika tesnil. Pri tem se v prekatih izvaja sesanje zraka iz okolice, pri čemer se naredi tlačna bariera in izpust pare z notranjosti turbine. Izguba vodne pare na tesnilnih elementih je zajeta v izračun učinkovitosti agregata.



Slika 9: Prikaz delovanja in sestave labirintnih tesnil

Vir: (Vaukesha bearings)

Guvernerski sistem:

Regulacijski sistemi so krmilni sistemi, občutljivi na hitrost, ki so del parne turbine. Hitrost turbine s krmiljem in spreminjanjem pretoka pare poteka skozi turbino z namestitvijo regulacijskega ventila. Sestavljen je iz vzmetno nasproti vrtečih se uteži, parnega ventila in povezovalne povezave ali sistema servomotorja. Regulator zaznava hitrost turbinske gredi prek neposredne povezave kolesa ali magnetnega impulza iz zobnika. Za ta namen se uporabljajo hitrostni senzorji, ki določajo hitrost gredi na merilni ploskvi ali zobniku, pritrjenem na skrajnem delu gredi parne turbine. Regulator ali guvernerski sistem hitrosti se odziva na spremembe hitrosti/obremenitve. Regulator tlaka uravnava izhodni tlak, ko se spremenijo potrebe procesa. Preprosta sprememba položaja ventila pri konstantnem položaju vstopnega ventila bi prav tako spremenila hitrost/obremenitev. Zato oba sistema medsebojno delujeta, da vzdržujeta konstantno obremenitev. Na primer, zmanjšanje potreb po procesni pari povzroči zmanjšanje ekstrakcije in dvig tlaka ekstrakcije. Regulator tlaka odpre ekstrakcijski ventil, s čimer poveča pretok nizkotlačnega dela in moč. Hkrati deluje tako, da sorazmerno zapre vstopni ventil, da zmanjša vstopni pretok in ohranja konstantno hitrost/obremenitev. Slika 10 prikazuje kolo in mehanski guvernerski sistem proizvajalca Woodward.



Slika 10: Prikaz zobnika za sledenje hitrosti gredi in mehanskega regulatorja

Vir: (Turbimaq in Woodward)

Hitrost turbine se primerja z neko vnaprej določeno nastavljeno točko in izhodnim signalom regulatorja na servomotor. Sprememba pogojev dovoda turbine in izpušne pare ter moči, ki jo potrebuje črpalka, bodo povzročili spremembo hitrosti turbine. Sprememba hitrosti povzroči prestavitev uteži regulatorja in posledično nastavitev ventila regulatorja.

Sistem za preprečevanje prekoračitve hitrosti (turbine trip function):

Sprožilni zavorni mehanizem deluje neodvisno od sistema, ki ga krmili regulator oz. gouvernement, in zapre sprožilni ventil, da ustavi pretok pare v turbino v primeru prekoračitve hitrosti. Sestavljen je iz vzmetno obremenjenega zatiča ali uteži, nameščene na gredi turbine na obroču, ventila za hitro zapiranje, ki je ločen od regulacijskega ventila, in povezovalne povezave. Centrifugalna sila, ki nastane zaradi vrtenja čepa v turbinski gredi, presega obremenitev vzmeti pri prednastavljeni hitrosti.

Posledično premikanje sprožilnega zatiča povzroči, da se robovi nožev v povezavi ločijo in omogočijo, da se vzmetni sprožilni ventil zapre. Regulatorji prekoračitve hitrosti so urejeni tako, da se sprožijo pri 10 odstotkih nad normalno hitrostjo in sprožijo zaporni ventil za hitro zapiranje, da se prekine dovod pare v turbino. Slika 11 prikazuje zatič na gredi parne turbine.



Slika 11: Prikaz zatiča za prisilno zaustavitev parne turbine

Vir: (Turbimaq)

Diafragme:

Stacionarne diafragme ločujejo notranje stopnje lopatic rotorja, vsebujejo medstopenjske šobe in medstopenjska tesnila. Diafragme so pritrjene na ohišje parne turbine. Le-te razširijo paro in jo usmerijo proti naslednjim stopnjam vrtečih se lopatic. Membrane so pri montaži nastavljene tako, da omogočajo odklon rotorja in zagotavljajo, da so tesnila koncentrična z gredjo. Spodnja polovica diafragme je nameščena pravokotno v utorih ohišja in bočno s pomočjo nastavitvenih vijakov na vodoravnem spoju. Na sliki 12 so prikazane diafragme na ohišju enostopenjske impulzne parne turbine. (Heinz Bloch, 2008)



Slika 12: Prikaz pritrjene diafragme na ohišje parne turbine

Vir: (Turbimaq)

3.3 Uporaba parnih turbin

Za učinkovito in zanesljivo poganjanje generatorjev, kompresorjev in drugih pretočnih pogonov tekočin je skoraj vsaka industrija odvisna od gonil parnih turbin. Različni tipi pretočnih pogonov tekočin pogosto zahtevajo spremenljive vhodne hitrosti, parne turbine pa jih lahko zagotovijo brez večjih težav. Pri aplikacijah lahko pride do situacij, v katerih procesni obrat potrebuje velike količine toplote. Sodobna parna turbina z mehanskim pogonom se je izkazala za zmožno povečati učinkovitost obrata, tako da omogoči, da se pogonska para najprej razširi skozi niz lopatic in se nato uporabi v procesu ogrevanja drugje v obratu ali kot uporabna para za ogrevanje stavb na kraju samem ali v skupnosti, kar imenujemo daljinsko ogrevanje.

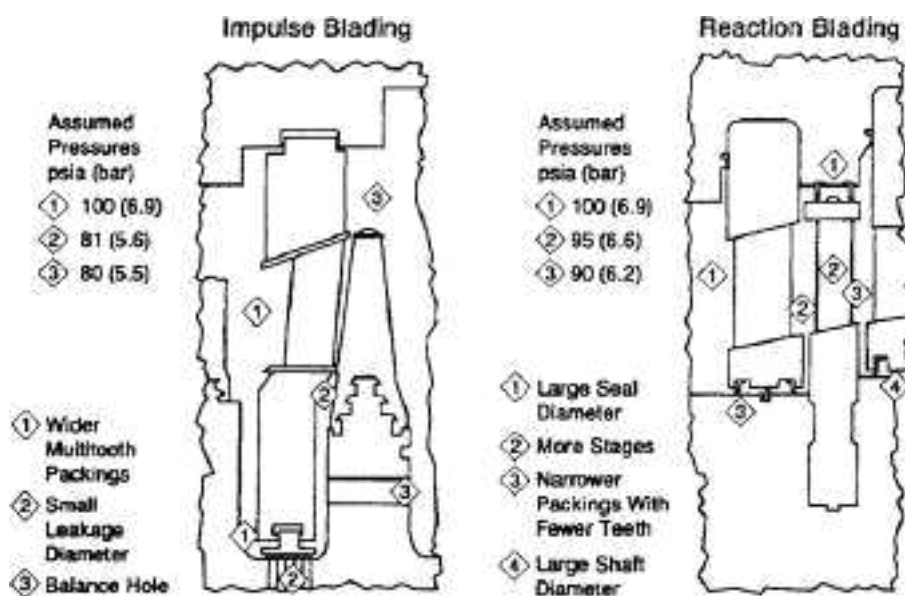
Gospodarnost in izvedljivost teh in številnih sorodnih aplikacij sta odvisni od zanesljivosti parnih turbin. Obstaja tudi močna odvisnost od zmožnosti izbranih modelov in geometrij parnih turbin za obvladovanje danih pogojev pare pri želenem pretoku ali izhodni zmogljivosti.

Ugotavljamo, da so bile v večini velikih, zapletenih petrokemičnih obratov, zlasti v obratih, kjer se para proizvaja ali porablja v procesu, glavne izbire parne turbine z mehanskim pogonom. Te velike enote s spremenljivo hitrostjo so kritična komponenta v kemičnih procesih z neprekinjenim tokom in so v večini primerov v uporabi brez rezervne zmogljivosti. Ta vrsta aplikacije zahteva najvišjo zmogljivost glede zanesljivosti in razpoložljivosti. Ti dve zahtevi tvorita temelj razvojnih programov, ki potekajo v oblikovalskih in proizvodnih obratih vodilnih svetovnih proizvajalcev opreme in so definirane s standardom API611 in API612. Bolj kot kdaj koli prej se petrokemične in druge industrije soočajo z močno svetovno konkurenco, kar je povzročilo potrebo po cenejši opremi. Globalna konkurenca je ustvarila tudi povpraševanje po modifikaciji obstoječih parnih turbin za povečanje učinkovitosti, povečanje izhodne moči na maso porabljene pare. Izdelava te opreme brez ogrožanja kakovosti, učinkovitosti in zanesljivosti ni enostavna in le najboljši industrijski proizvajalci sveta so kos tej nalogi.

Poglejmo, kako parna turbina pretvori toplotno energijo pare v koristno delo. Diafragme v turbini so zasnovane tako, da usmerjajo tok pare z veliko hitrostjo, ko se para širi od vstopnega do izstopnega tlaka. Ta tok pare udarja v premikajoče se vrste lopatic, nameščenih na rotorju. Lopatice pretvarjajo kinetično energijo pare v rotacijsko energijo gredi. Obstajata dve glavni vrsti turbin: reakcijska in impulzna. V reakcijski turbini se para širi tako v stacionarnih kot v rotacijskih lopaticah. Rotacijske lopatice so zasnovane tako, da izkoriščajo energijo parnega toka mirujočih lopatic in same delujejo kot šobe. Ker gre za premikajoče se šobe, reakcijska sila, ki nastane zaradi padca tlaka na njih, dopolnjuje silo parnega toka stacionarnih lopatic. Te

združene sile povzročajo mehansko vrtenje. Za učinkovito delovanje mora biti reakcijska turbina zasnovana tako, da so izgube okoli rotacijskih lopatic čim manjše. To dosežemo tako, da je večina notranjih zračnosti relativno majhna. Reakcijska turbina običajno zahteva ravnotežni cilinder (podoben tistim, ki se uporabljajo v velikih centrifugalnih kompresorjih) zaradi velikih ustvarjenih potisnih obremenitev. Impulzna turbina ima majhen ali nič padca tlaka na rotacijskih lopaticah. Energija pare se v celoti prenese na rotor s pomočjo parnega toka skozi statorske diafragme, ki udarijo v gibljive lopatice (glej sliko 13, kjer je opazna razlika med zračnostjo rotacijskih lopatic in ohišja pare turbine). (Heinz Bloch, 2008)

Impulzne turbine imajo kanale med lopaticami statorja oblikovane konvergentno, kar pomeni, da se presek vzdolž kanala zmanjšuje, zato se hitrost pare povečuje, tlak pare pa zmanjšuje. Kanali med lopaticami rotorja pa imajo konstanten presek, tako da se v njih hitrost in tlak pare ne spreminjata. Torej je tlak pare na vstopu in izstopu rotorskega kanala enak. Pri reakcijskih turbinah se del tlačne energije spreminja v kinetično statorskih kanalih, ostanek pa v rotorskih kanalih. To dosežemo tako, da so kanali konvergentni v statorju in rotorju. Tlak se torej manjša v statorju in v rotorju, tako da se hitrost pare povečuje tudi v rotorju. Pri obeh tipih velja, da se s padcem tlaka povečuje volumen vodne pare, posledično pa se morajo povečati tudi površine lopatic. (Tomšič, 2010)

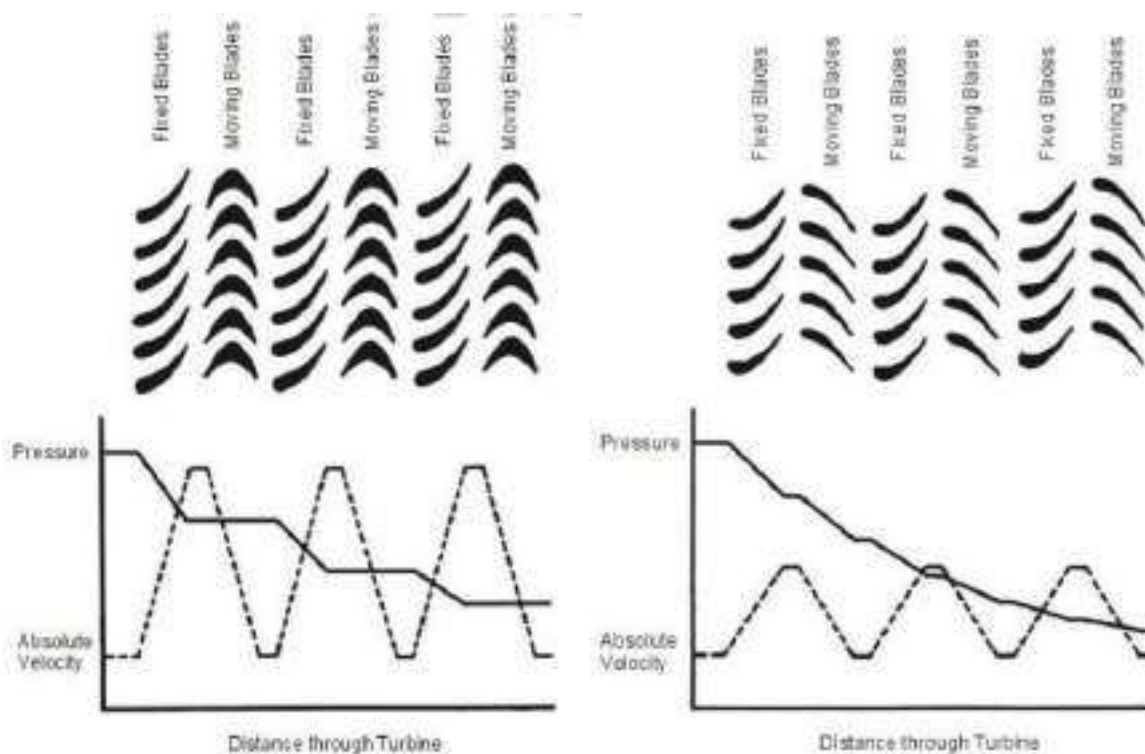


Slika 13: Prikaz tipa stopnje reakcijske in impulze parne turbine

Vir: (General Electric Company, Fitch- burg, Mass.)

V bistvu je razlika med impulzno in reakcijsko turbino ta, da v impulzni turbini para potuje skozi šobe in udarja ob premikajoče se lopatice. V reakcijski turbini para najprej teče skozi vodilni mehanizem in nato skozi gibljive lopatice. V impulzni turbini udarja para na gibljive lopatice samo s kinetično energijo. Toda v reakcijski turbini ima para, ki drsi čez gibljive lopatice, tlak in kinetično energijo. V impulzni turbini ostaja tlak pare konstanten med njenim pretokom skozi gibljive lopatice. Toda v reakcijski turbini se tlak pare med pretokom skozi gibljive lopatice zmanjša. V impulzni turbini je pretok pare lahko ali pa tudi ne po celotnem obodu. V reakcijski turbini mora biti pretok pare po celotnem obodu. Lopatice impulzne turbine so simetrične, medtem ko pri reakcijski turbini so asimetrične. Relativna hitrost pare v impulzni turbini ostane konstantna, v reakcijski turbini pa se poveča med prehajanjem po lopaticah. Za enako razvito moč je število potrebnih stopenj v impulzni turbini manjše, medtem ko je pri reakcijski turbini potrebno več stopenj. Tok pare v impulzni turbini je radialen glede na turbinski rotor, medtem ko je kot pri reakcijski turbini tok pare radialen in aksialen. Gledano uporabo med obema tipoma je impulzna turbina primerna tam, kjer je izpust nizek, reakcijska turbina pa za srednji in visok izpust. (Heinz Bloch, 2008)

Pri razlikovanju med impulznim in reakcijskim tipom je treba upoštevati, kaj se zgodi s paro pri prehodu skozi eno stopnjo fiksnih in gibljivih rezil. V impulzne turbine je celoten padec tlaka stopnje koncentriran na fiksna rezila, ki delujejo kot šobe. Te šobe pospešijo paro do velike hitrosti, kar narekujejo pogoji pred in po statorskih lopaticah. Ta velika hitrost pare udari v rotorske lopatice in jih poganja z določeno hitrostjo. Znotraj rotorskih lopatic se para obrne, da vpliva na prenos energije in pusti nizko hitrost glede na naslednjo vrsto statorskih lopatic. V reakcijski turbini pa je padec tlaka na stopnji še porazdeljen, in sicer tako na statorske kot na rotorske lopatice. Statorske lopatice delujejo kot šobe in zaradi parcialnega tlaka pospešijo paro do zmerne hitrosti. Ta para nato udari v rotorske lopatice in jim preda nekaj energije. Znotraj rotorskih lopatic se para obrača in pospešuje s preostankom padec tlaka. Reakcijski učinek, ki ga povzroči ta pospešena para, daje več energijo do rotorskih lopatic. Para zapusti stopnjo z nizko hitrostjo glede na naslednjo vrsto statorskih lopatic. To je prikazano na sliki 14: levo za impulzno stopnjo in desno za reakcijsko stopnjo parne turbine. (Chaplin, 2009)



Slika 14: Prikaz prehoda tlaka vodne pare čez stopnjo reakcijske in impulze parne turbine

Vir: (Steam turbine Impulse and Reaction blading. R. A. Chaplin)

3.4 Impulzne parne turbine

Impulzna turbina, ki jo je leta 1883 prvič zgradil švedski inženir De Laval, je bila neizogibno v prednosti v zgodnjih dneh parnih turbin, ker je zelo primerna za majhne količine pretoka. Kasnejše postopno, a vedno pospešeno povečevanje porabe električne energije je povzročilo hiter dvig enotnih zmogljivosti turbin elektrarn. Moči, potrebne za mehanske pogone, so bile tehnologija impulzne ali akcijske parne turbine, ki se uporablja v aplikacijah parnih turbin kot single stage rotors in multistage rotors. Parna turbina impulznega tipa je vrsta parne turbine, pri kateri se kinetična energija pare poveča v šobah, preden ta udari na lopatice turbine. Ta zasnova temelji na načelu, da se lahko energija tekočine (v tem primeru pare) poveča s povečanjem njene hitrosti in istočasnim zmanjšanjem njenega tlaka. Lopatice impulzne turbine so zasnovane tako, da pretvarjajo kinetično energijo pare v mehansko energijo, ki se nato uporablja za pogon gnanih rotacijskih elementov postrojenja. Tehnične lastnosti turbine tipa impulzne so:

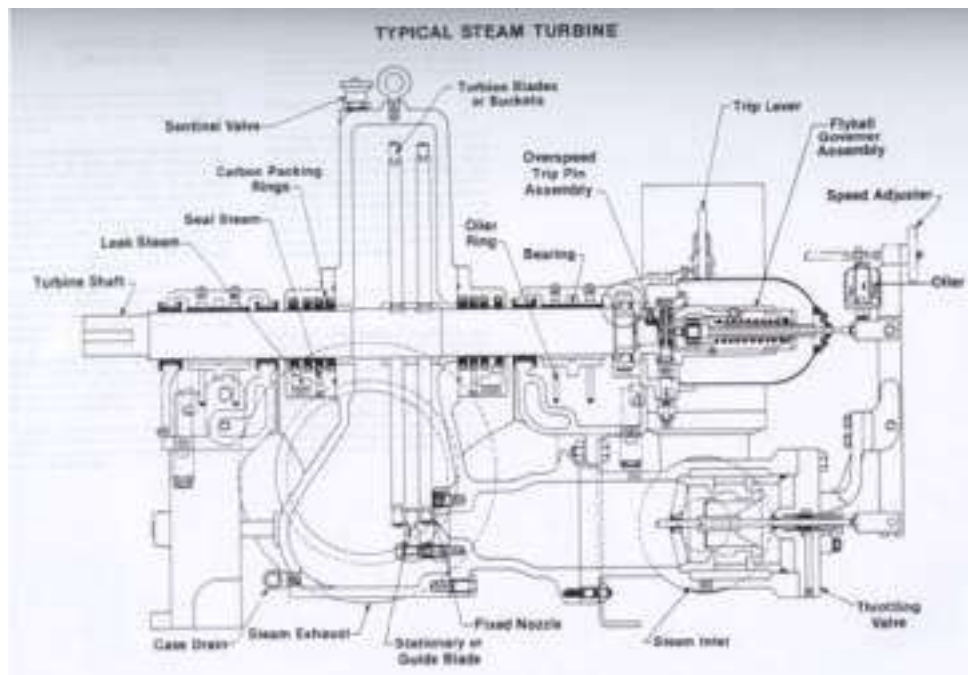
- padci tlaka v šobah in ne v premikajočih se lopatic,
- konstantna površina lopatic,

- omejen krog ali nepopoln vstop pare,
- diafragma vsebuje šobe,
- zavzame manj prostora za enako moč,
- večja učinkovitost v začetni fazi,
- izdelava ni zahtevna,
- hitrost pare je velika.

Lastnosti rotorjev impulzne turbine:

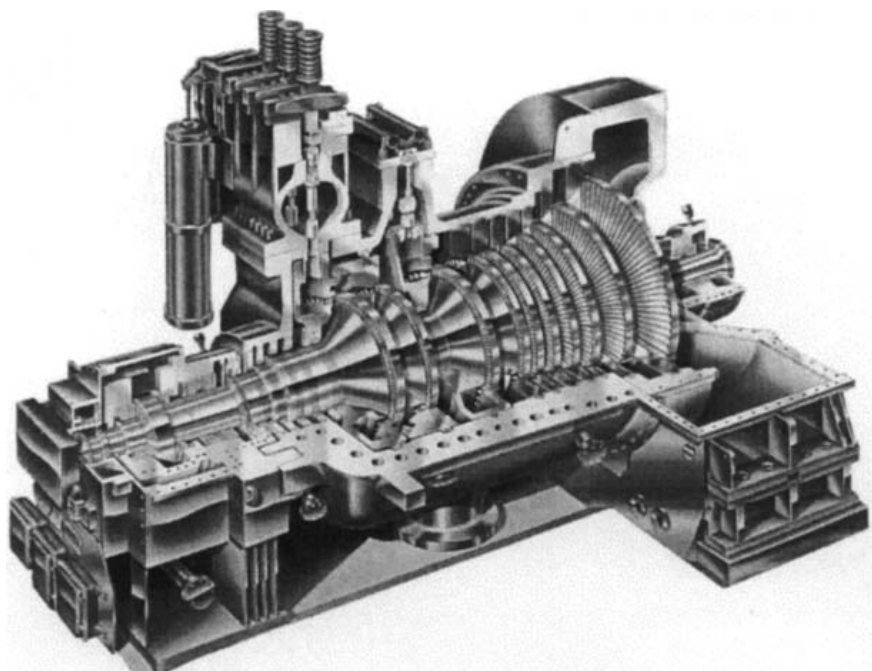
- Rotorji so sestavljeni iz diskov.
- Z vidika vibracij so diski neodvisne strukture in njihovo obnašanje je treba upoštevati pri načrtovanju. Med delovanjem se te vibracije diska prekrivajo z vibracijami rotorja. Posledica tega je lahko zapleten vzorec vibracij.
- Materialne napake lahko zahtevajo razgradnjo celotnega rotorja.
- Pri kolutnih rotorjih relativno majhnega premera hitre temperaturne spremembe, na primer pri zagonu, spremlja večja nagnjenost k deformacijam.
- Glavna masa rotorja je v njegovem središču. Ker so lopatice nameščene na zunanji strani tankih diskov, je takšen rotor, ko je uravnotežen, nekoliko bolj občutljiv na enakomerno porazdelitev mase lopatic kot reakcijski rotor. (Heinz Bloch, 2008)

Slika 15 in 16 prikazujeta tipično enostopenjsko in večstopenjsko parno turbino v prerezu.



Slika 15: Single stage impuls turbine

Vir: (Dresser rand)



Slika 16: Multi stage impuls turbine

Vir: (GE Energy)

3.5 Reakcijske parne turbine

Parne turbine s termodinamičnega vidika so razdeljene na impulzne in reakcijske turbine ter na aksialne in radialne pretočne turbine, ki označujejo glavno smer toka pare. Aksialni stroji so prav tako opredeljeni glede na njihovo konstrukcijo rotorja kot diskaste ali bobnaste turbine. Ker se izrazi običajno razumejo, impulzna turbina z malo ali brez reakcije ustreza tipu konstrukcije diska, reakcijska turbina pa tipu bobna.

Bistvene razlike med obema vrstama je mogoče obravnavati v dveh kategorijah, termodinamičnih in konstrukcijskih. Razlike slednje vrste v veliki meri določajo prve.

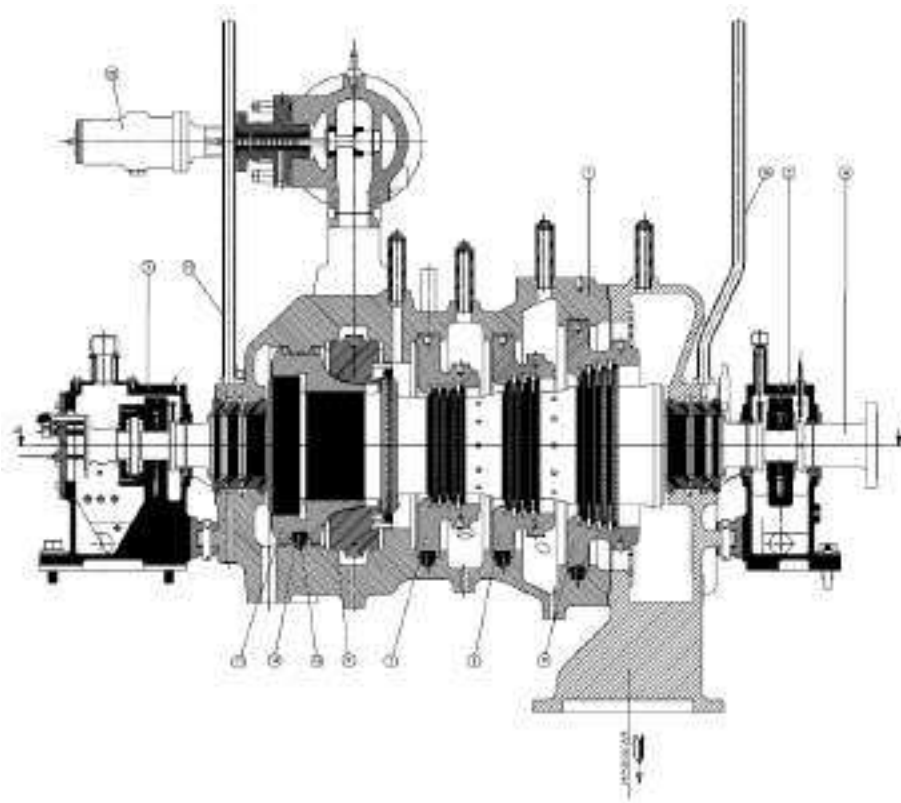
Pri reakcijski je turbini možno bistveno izboljšanje učinkovitosti, zlasti pri nizkih prostorninskih koeficientih. Iz ekonomskih razlogov je ta tehnika postala standardna praksa za turbine elektrarn nad določeno zmogljivostjo. Na sliki 8 je prikazana 3 MW reakcijska parna turbina v prerezu.

Lastnosti rotorjev reakcijske turbine:

- Rotorji so izdelani v obliki bobna, obdelanega iz masivnega materiala, ali pa so sestavljeni iz ločenih odkovkov. Od leta 1930 so rotorji vseh srednjih in velikih turbin, ki jih proizvaja vsaj en večji proizvajalec, sestavljeni iz medsebojno zvarjenih delov. O prednostih te konstrukcije so že poročali in so v veliki meri povezane z izdelavo.
- Rotor je mogoče enakomerno toplotno obdelati, zato so vsepovsod dosegljive odlične trdnostne lastnosti.
- Rotor je zelo enostavno preizkusiti.
- Deli so enostavno in hitro zamenljivi.
- Rotor ima enakomerno porazdeljene napetosti.
- Če je rotor reakcijske turbine izdelan iz ulitka, pride do enake situacije v primeru napak v materialu kot pri impulznem rotorju.

(Heinz Bloch, 2008)

Na sliki 17 je prikazana reakcijska turbina v prerezu.



Slika 17: Multi stage reaction turbine

Vir: (Turbimaq)

3.6 Protitlačne parne turbine

Protitlačne parne turbine so vrsta parne turbine, ki se uporablja za proizvodnjo električne energije ali pogon strojev, kot so kompresorji in pretočne črpalke. Zasnovani so za delovanje s paro, ki se izpušča pri tlaku, nižjem od vstopnega tlaka. V protitlačnih parnih turbinah visokotlačna para vstopi v turbino in se razširi skozi stopnje turbine, pri čemer ima vsaka stopnja svoj niz stacionarnih in vrtljivih lopatic. Energija pare se pretvori v mehansko energijo, ko teče skozi turbino, ta pa poganja generator za proizvodnjo električne energije. Para, ki izstopa iz turbine pri nižjem tlaku, se običajno uporablja za industrijske procese, kot je npr. ogrevanje. Možnost je tudi, da se lahko uporabi za ustvarjanje več električne energije, tako da jo spusti skozi kondenzacijsko turbino ali generator pare z rekuperacijo toplote.

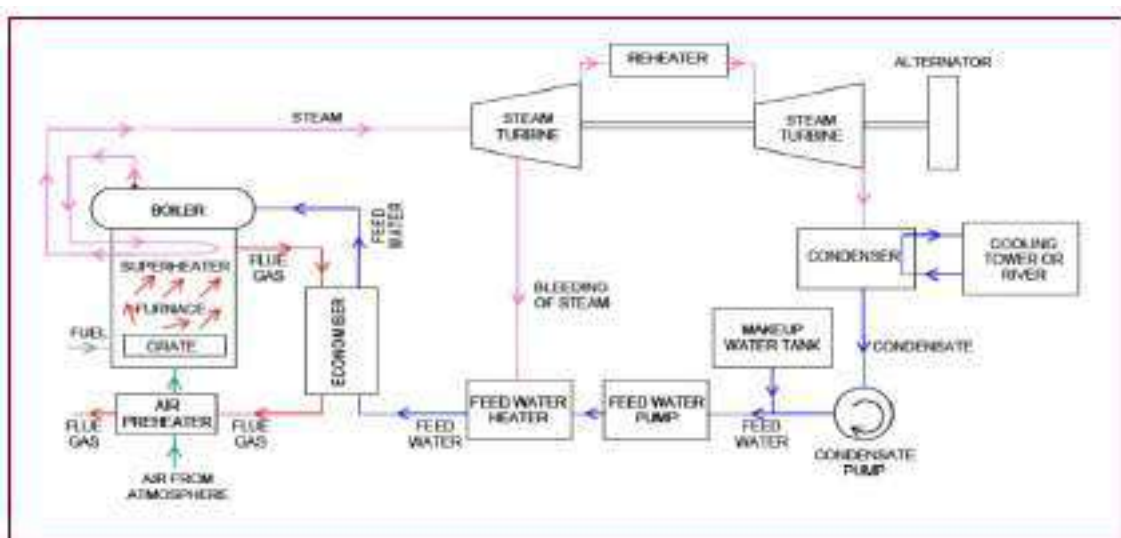
Protitlačne parne turbine se običajno uporabljajo v industrijskih obratih, ki za svoje procese potrebujejo tako električno energijo kot paro, kot so kemične tovarne, tovarne celuloze in papirja ter rafinerije. Uporabljajo se tudi v sistemih soproizvodnje, kjer se odpadna toplota iz turbine rekuperira in uporablja za ogrevanje ali hlajenje zgradb. (Heinz Bloch, 2008)

3.7 Stabilne in regulirane ekstrakcijske parne turbine

V parni turbini sta odvodna ekstrakcija in nadzorovana ekstrakcija dve metodi, ki se uporabljata za odvzem pare iz različnih stopenj turbine za posebne namene. Odzračevalna ekstrakcija vključuje ekstrakcijo pare pri stabilnem tlaku in temperaturi iz določene stopnje turbine in njeno uporabo za določen namen, kot je ogrevanje ali procesna para. Ekstrakcija se običajno uporablja, ko sta zahtevana tlak in temperatura pare za določen namen nižja od tlaka in temperature pare v turbinski stopnji.

Nadzorovano oz. regulirano dovzemanje vključuje odvzem pare pri spremenljivem tlaku in temperaturi iz različnih stopenj turbine in njeno uporabo za določen namen, kateri je lahko enak kot pri stabilnem odvzemu pare za ogrevanje, za procesno paro ali ogrevanje napajalne vode. Nadzorovano odvzemanje se običajno uporablja, kadar sta zahtevan tlak in temperatura pare za določen namen v območju, ki ga je mogoče prilagoditi glede na obremenitev turbine in pogoje delovanja. Tako stabilna kot kontrolirana ekstrakcija imata svoje prednosti in slabosti, izbira med njima pa je odvisna od več dejavnikov, kot so specifičen namen, zahtevani tlak in temperatura vodne pare, pogoji delovanja turbine in skupni izkoristek elektrarne. Na splošno ima nadzorovana ali regulirana ekstrakcija prednost pred stabilno ekstrakcijo, ker zagotavlja večjo prilagodljivost pri ekstrakciji pare in lahko pomaga izboljšati splošno učinkovitost elektrarne. (Heinz Bloch, 2008)

Na sliki 18 je prikazana shema stabilne ekstrakcije pare iz procesa parne turbine, označena kot Bleeding of steam.



Slika 18: Ekstrakcija pare pri procesu delovanja parne turbine

Vir: (internet)

3.8 Proizvodnja električne energije s pogonom parne turbine generatorja

Proizvodnja električne energije s parno turbino je proces, pri katerem se para uporablja za vrtenje turbinskega generatorja za proizvodnjo električne energije. Postopek običajno vključuje proizvodnjo vodne pare s segrevanjem vode v kotlu z uporabo vira goriva, kot je premog, zemeljski plin ali jedrska energija. Visokotlačna para, ki nastane v kotlu, je usmerjena v parno turbino, kjer se razširi, zaradi česar se lopatice in gred turbine krožno vrtijo. Ko se gred turbine vrti, se obrača tudi gred generatorja, ki proizvaja elektriko. Količina proizvedene električne energije je sorazmerna s hitrostjo vrtenja turbine. Po prehodu skozi turbino se nizkotlačna para usmeri v kondenzator ali predhodno, če je turbina protitlačna, v nadaljnji proces. V kondenzatorju se vodna para ohladi in kondenzira nazaj v tekočo obliko. Ta kondenzirana voda se nato reciklira nazaj v kotel in se ponovno segreje, temu pravimo zaprti cikel. Med delovanjem kondenzatorja se toplota, proizvedena med postopkom kondenzacije ali utekočinjenja, običajno odstrani s kroženjem hladilne vode skozi kondenzator, izmenično delovanje.

Distribucija električne energije, ki jo proizvede generator, se običajno napaja v transformator, kjer se poveča na višjo napetost za prenos na dolge razdalje. Visokonapetostna električna energija se nato prenaša po električnih vodih do transformatorske postaje, kjer se zniža na nižjo napetost za distribucijo v domove, podjetja in druge porabnike. Splošno velja, da je proizvodnja električne energije s parnimi turbinami zelo učinkovita in zanesljiva metoda proizvodnje električne energije, ki se pogosto uporablja v elektrarnah po vsem svetu. Okolju prijazen cikel se v večini razlikuje pri izbiri toplote za delovanje kotla za proizvodnjo vodne pare. (Heinz Bloch, 2008)

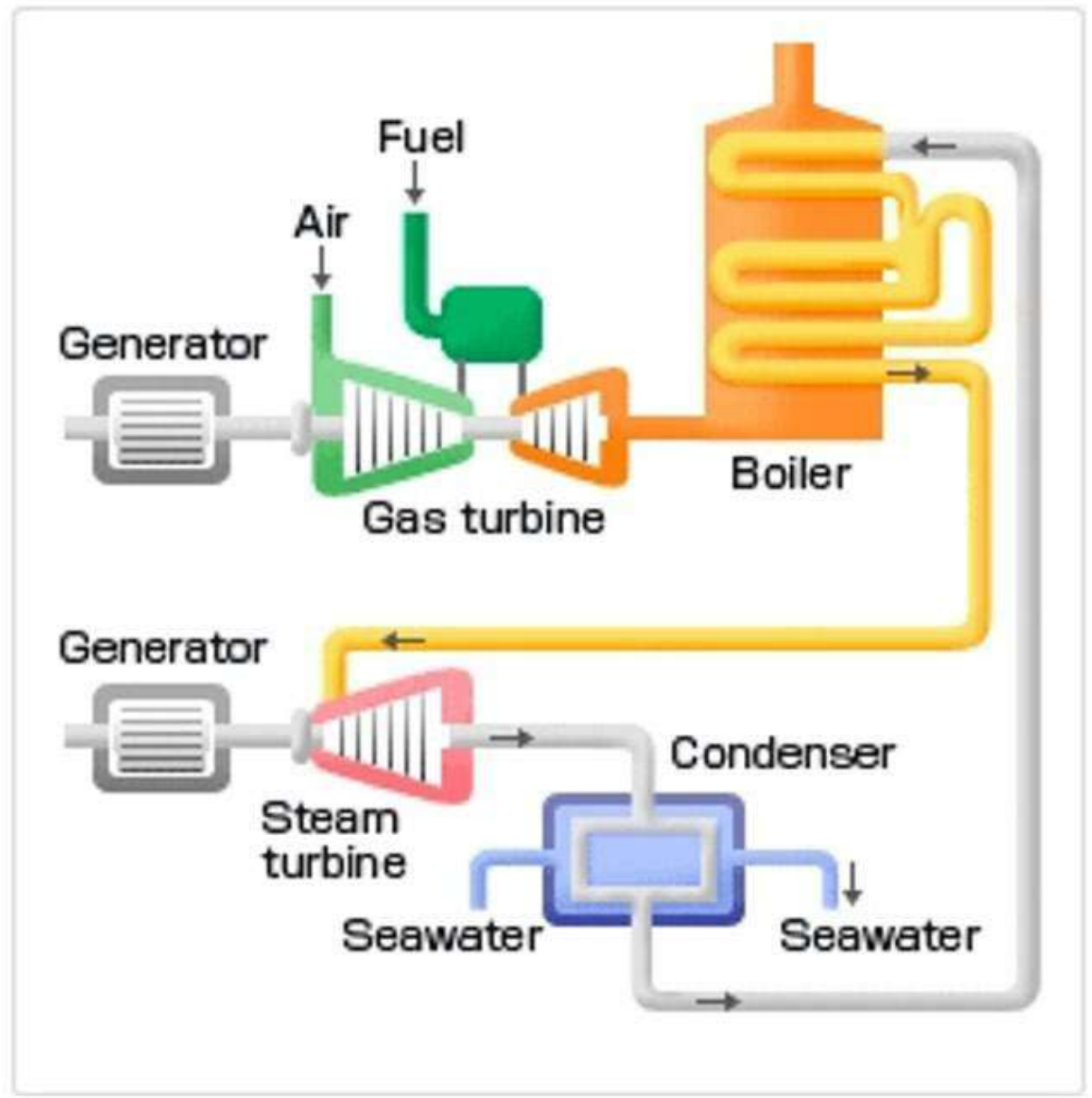
3.9 Kombiniran cikel proizvodnje električne energije

O kombiniranem ciklu proizvodnje električne energije običajno govorimo, kadar se za proizvodnjo električne energije uporabljajo, npr. plinske turbine, in pri čemer se s pomočjo toplote izpušnih plinov greje voda v parnem kotlu, ki v nadaljevanju napaja parno turbino. S tem združujemo dve vrsti tehnologij za proizvodnjo električne energije.

Kombinacija obeh turbin ima za posledico veliko bolj učinkovit proces proizvodnje električne energije kot uporaba samo ene tehnologije. Skupni izkoristek kombiniranih elektrarne lahko doseže do 60 %, kar je bistveno višje od tradicionalne elektrarne s plinsko turbino.

Elektrarne s kombiniranim ciklom se pogosto uporabljajo v energetske industriji, saj ponujajo številne prednosti. So učinkovitejše in okolju prijaznejše od tradicionalnih plinskoturbinskih elektrarn. V projektni nalogi je prikazana menjava parne turbine na takšnem kombiniranem postrojenju. (Heinz Bloch, 2008)

Na sliki 19 je prikazana shema delovanja kombiniranega cikla.



Slika 19: Kombiniran cikel plinske in parne turbine elektrarne

Vir: (Mitsubishi heavy industry)

3.10 Parni krožni proces

Parni krožni proces v termoelektrarnah poteka med dvema izotopoma in dvema izobarama. Pri tem delovna snov, to je v večini primerov voda, v procesu spreminja agregatno stanje. V parnem kotlu voda preide iz tekočega v plinasto stanje, v kondenzatorju pa se para ponovno spremeni v tekoče stanje. Osnova parnega krožnega procesa poteka tako v energetskih napravah in strojih v naslednjem zaporedju: napajalna črpalka, parni kotel, turbina in kondenzator. Krožni proces je zaprt z možnostjo regenerativnega gretja vode, večji termoeenergetski objekti imajo v kotlu izvedeno še ponovno pregrevanje vodne pare. Idealni proces poteka po naslednjih korakih: Korak 1 – s kondenzacijsko črpalko se dvigne tlak kondenzatu od tlaka v kondenzatorju do tlaka v napajalnem rezervoarju. Korak 2 – v nizkotlačnih grelnikih poteka regenerativno gretje kondenzata. Korak 3 – z napajalno kotlovsko črpalko se dvigne tlak napajalni vodi od tlaka v rezervoarju napajalne vode do tlaka sveže pare. Korak 4 – v visokotlačnih grelnikih poteka regenerativno gretje napajalne vode. Korak 5 – uparjanje in dogrevanje napajalne vode v parnem kotlu. Korak 6 – pregrevanje pare v parnem kotlu. Korak 7 – ekspanzija sveže pare v visokotlačnem delu parne turbine. Korak 8 – ponovno pregrevanje pare v parnem kotlu. Korak 9 – ekspanzija ponovno pregrete pare v srednjem in nizko – tlačnem delu turbine. Korak 10 – kondenziranje pare v kondenzatorju. (Trop, 2011)

3.11 Učinkovitost parnih turbin

Sodobni projektirani cikli s parno turbino so se izkazali s sposobnostjo povečati učinkovitost proizvodnega procesa, tako da omogoči, da vodna para najprej ekspandira skozi niz lopatic parne turbine in se nato uporabi v nadaljnjem proizvodnem procesu ali daljinskega ogrevanja. Gospodarnost in izvedljivost teh aplikacij sta odvisni od zanesljivosti parnih turbin. Obstaja tudi močna odvisnost od zmožnosti izbranih modelov in tipov parnih turbin za obvladovanje danih pogojev pare pri želenem pretoku ali izhodni zmogljivosti. Pri tem se na dane zahteve izbira parna turbina. Le-te imajo glede na tip različne izkoristke. Pri tem razlikujemo med enostopenjske impulzne turbine, večstopenjske impulzne turbine in večstopenjske reakcijske parne turbine. Izkoristek je odvisen tudi od tipa aplikacije večstopenjskih turbin recimo z reguliranim ekstrakcijami med stopnjami turbine, kondenzacijskimi in protitlačnimi turbinami. Za določanje učinkovitosti parnih turbin se uporabljajo izračuni na podlagi termodinamike. Parna turbina je stroj, ki spremeni energijo vodne pare v mehansko energijo. Energija vodne

pare je na razpolago zaradi pritiska in temperature vodne pare. Oddano delo je v obliki navora na gredi parne turbine pri določeni hitrosti obratov gredi. Moč je podana z naslednjo formulo.

$$P = M\omega$$

Pri čemer velja:

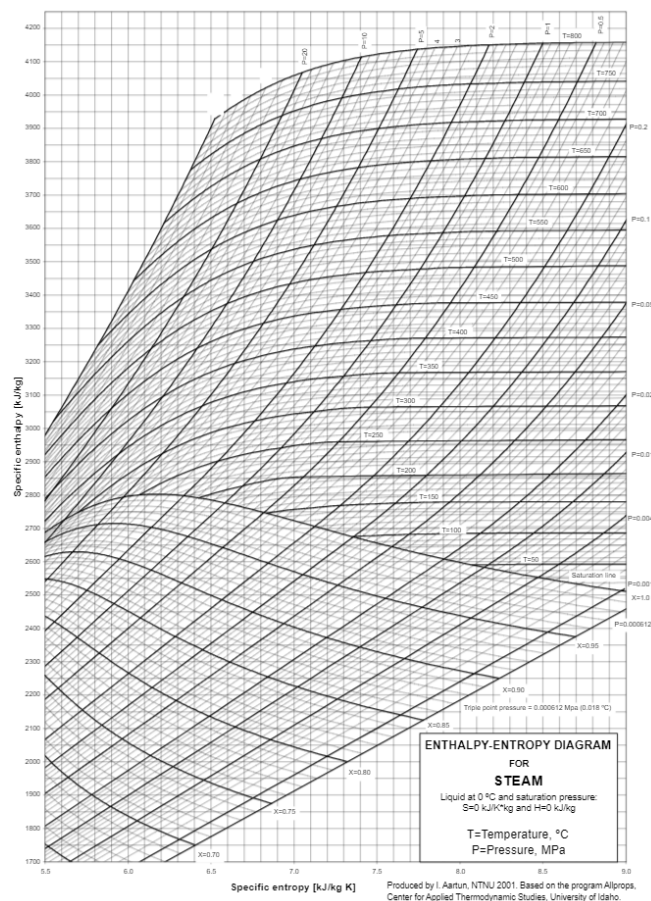
$$P = \text{moč},$$

$$\varepsilon = \text{izkoristek},$$

$$M = \text{moment na gredi}.$$

Proces, ki se izvaja v parni turbini, je raztezanje, kar pomeni, da vodna para zmanjšuje svoj tlak ob raztezanju čez stopnje turbine. Prikaz oddajanja energije se lahko prikaže z Mollierev diagramom. Mollierev diagram, znan tudi kot diagram entalpija-entropija ali diagram H-S, je grafični prikaz termodinamičnih lastnosti snovi. Diagram prikazuje razmerje med entalpijo (H), entropijo (S), tlakom (P), temperaturo (T) in prostornino (V) za določeno snov in določitve izkoristka parnih turbin treh različnih tipov. Treba je dodati, da so lastnosti vodne pare podane s temperaturo, pritiskom, specifičnim volumnom, entalpijo in entropijo. Pri čemer sta najpomembnejša podatka temperatura in pritisk vodne pare, saj lahko s temi podatki določimo ostale lastnosti. Entalpija je funkcionalni status, ki določa energijo vodne pare in je podana v kJ/kg. Entropija je prav tako funkcionalni status in prikazuje količino toplote, ki se ne more spremeniti v delo in je podana v enoti kJ/kg °K. V idealnem sistemu bi bila entropija enaka nič, vendar v transformaciji vodne pare narašča od začetne do končne vrednosti. Na Mollierevem diagramu, prikazanem na sliki 20, lahko enostavno določimo potrebno raztezanje pare v parni turbini, pri čemer označimo izhodiščno točko z vhodnimi parametri in izstopno točko z izhodnimi parametri. Posledično nam oblika ekspanzijske linije, da idejo o učinkovitosti ekspanzije. Le kot primer, če bi želeli prikazati 100 %, učinkovitost parne turbine mi bila linija popolnoma navpične oblike. Pri strojih, ki pretvarjajo toplotno energijo, se termodinamični izkoristek, ki je izražen v odstotkih izkoristka toplotne energije in oddane mehanske energije, je podan kot razmerje med delom v stopnji in padcem entalpije v diafragmi. Termodinamična entalpija je funkcija stanja v termodinamiki, ki opisuje celotno količino energije v termodinamičnem sistemu, vključno z notranjo energijo in delom, potrebnim za ustvarjanje ali vzdrževanje tlaka ter prostornine sistema. Matematično je entalpija (H) opredeljena kot vsota notranje energije (U) in produkta tlaka (P) in prostornine (V) sistema:

$$H = U + PV$$



Slika 20: Mollierev diagram

Vir: (Mollier diagram)

Podatki Mollierevega diagrama se v veliki meri uporabljajo pri načrtovanju in analizi parnih turbin. Pri načrtovanju parne turbine inženirji uporabljajo Molliereve diagrame za določitev termodinamičnih lastnosti pare na različnih točkah v sistemu. Te informacije so ključne za izbiro ustreznih komponent turbine, kot so tip parne turbine, geometrija lopatic in diafragem, ter za optimizacijo delovanja sistema. Načini, za katere se Mollierevi diagrami uporabljajo pri oblikovanju parne turbine, vključujejo:

- določanje idealnega tlaka in temperature pare za največjo učinkovitost,
- izračun količine pretoka pare, potrebnega za dano izhodno moč,
- izbira ustrezne geometrije lopatic in diafragme glede na lastnosti pare,
- optimizacija cikla za največjo učinkovitost s prilagajanjem parametrov, kot sta tlak in temperatura pare na različnih točkah v sistemu.

Učinkovitost in izkoristek parne turbine je odvisna glede na tip turbine in njenih mehanskih delov, tipsko so izkoristki termodinamičnih veličin, ki se računajo s formulo:

$$\varepsilon = \frac{W}{E}$$

Pri čemer velja:

ε = *izkoristek*,

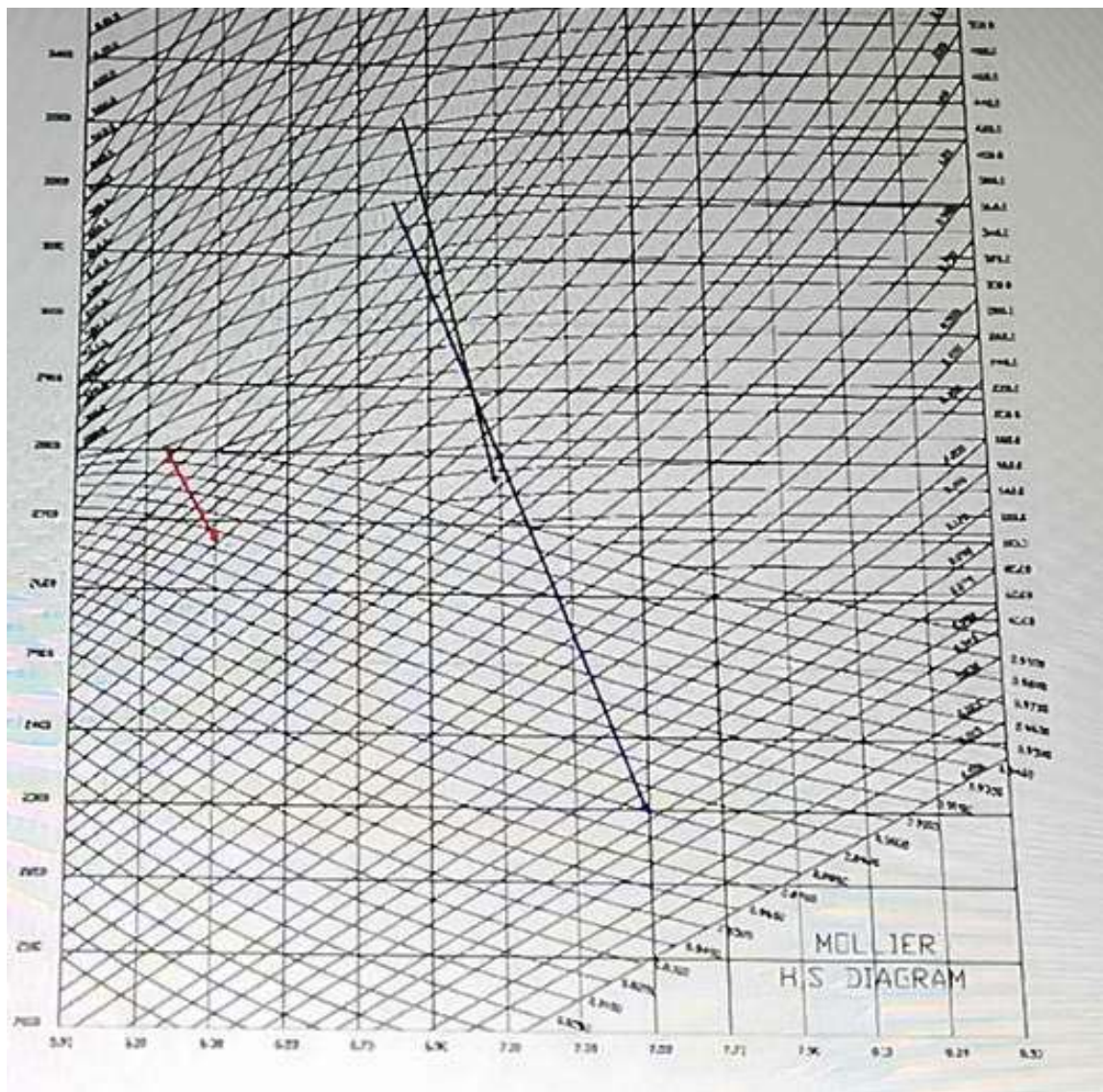
W = *oddano delo*,

E = *vloženo delo*.

Sprememba entalpije pri reakciji je enaka razliki med entalpijo produktov in entalpijo reaktantov.

- Enostopenjske impulzne turbine imajo izkoristek do 35 %.
- Večstopenjske impulzne turbine imajo izkoristek do 55 %.
- Večstopenjske reakcijske turbine moči do 10 MW imajo izkoristek do približno 85 %.

V nadaljevanju na sliki 21 je prikazana učinkovitost treh različnih parnih turbin, vsaka je označena z drugo barvo. Zelena linija pripada dotični parni turbini, ki je predmet te diplomske naloge in je tipa večstopenjska reakcijska parna turbina, modra linija pripada referenčni večstopenjski impulzni turbini in rdeča linija pripada enostopenjski impulzni turbini. Iz Mollierevega diagrama lahko takoj ugotovimo, ali govorimo o enostopenjskem ali večstopenjskem stroju, kar je razvidno, kadar gledamo linije, ki označujejo entalpije. V primeru rdeče linije je razvidno, da govorimo o enostopenjski parni turbini.



Slika 21: Mollierev diagram

Vir: (Mollier diagram by Turbimaq)

Iz slike 21 je tudi razvidno, da je najvišja učinkovitost parne turbine tipa reakcijska, označena z zeleno linijo. Pomeni, da je linija v diagram postavljena najbolj navpično.

4 PREDSTAVITEV REAKCIJSKE TURBINE RT400, UPORABLJENE V PROJEKTU

4.1 Tehnični podatki

Reakcijska parna turbina podjetja Turbimaq tipa RT400 je bila razvita in izdelana kot razvojni projekt v podjetju za namen implementacije v projektu Burgo Toscolano, pri čemer služi kot del kombiniranega cikla tovarne električne energije, ki je del tovarne proizvodnje papirja. Tip turbine je protitlačni, saj izhodna para pri določenem tlaku služi nadaljnjemu procesu tovarne pri delovanju strojev za izdelavo papirja.

Naloga parne turbine RT400 je delovanje v optimalnem zadanem območju mase vhodne pare pri 27 t/h in vhodnem tlaku 60 bar(a). Izhodni tlak turbine v idealnem območju je 4bar(a). Delovanje parne turbine ima sicer širši spekter ob različnih masah dovoda vodne pare in vhodnega ter izhodnega tlaka. V tabeli 2 je prikazana projektna tabela z različnimi vhodnimi in izhodnimi podatki ter upoštevajoč učinkovitosti gonila in generatorja.

V tabeli 2 je razvidna razlika med mehansko energijo, označeno z enoto kW, in električno energijo, označeno z enoto kWe. Predstavitev Optimum case B kaže, da parna turbina in celotno postrojenje proizvedeta 3.930 kWe električne energije. Predstavitev podatkov: Inlet steam flow prikazuje vhodno maso vodne pare, Inlet steam pressure prikazuje vhodni tlak atmosferske vodne pare, Inlet steam temperature prikazuje temperaturo vhodne vodne pare v stopinjah celsius in Enthalpy je entalpija pare oz. količnik energije v enoti kJ/kg. Entalpija pare je količina energije, ki jo vsebuje enota mase pare pri danem tlaku in temperaturi. Entalpija je termodinamična lastnost, ki upošteva notranjo energijo in delo, ki ga sistem opravi. Entalpija pare je običajno izražena v enotah kilojoulov na kilogram (kJ/kg). Izračuna se lahko z uporabo parnih tabel, ki zagotavljajo specifično entalpijo pare pri različnih kombinacijah tlaka in temperature. Entalpija pare je pomemben parameter v številnih inženirskih aplikacijah, zlasti v sistemih za proizvodnjo električne energije in prenos toplote.

Tabela 2: Parametri delovanja parne turbine

Case	Max. A	Optimum A	Max. B	Optimum B	Max. C	Optimum C	Max. D	Optimum D	
Inlet steam flow	32	27	32	27	32	27	32	27	Ton/h
Inlet steam pressure	60								bar(a)
Inlet steam temperature	470								°C
Enthalpy	3.351,19								kJ/kg
Bleed flow	2	2	-	-	2	2	-	-	Ton/h
Bleed pressure	16	16	-	-	16	16	-	-	bar (a)
Bleed temperature	306,6	305,9	-	-	306,6	305,9	-	-	°C
Enthalpy	3.050,38	3.048,67	-	-	3.050,38	3.048,67	-	-	kJ/kg
Exhaust flow	30	25	32	27	30	25	32	27	ton/h
Exhaust pressure	4				1,5				bar(a)
Exhaust temperature	189,7	190,3	169,8	169,2	130,5	131,9	131,0	130,8	°C
Enthalpy	2.833,68	2.834,92	2.796,69	2.795,27	2.723,25	2.726,43	2.724,40	2.723,94	kJ/kg
Turbine speed	10.500								rpm
Generator speed	1.500								rpm
Power in gearbox output shaft	4.276	3.571	4.714	4.010	5.194	4.306	5.357	4.490	kW
Power in generator terminal	4.190	3.500	4.620	3.930	5.090	4.220	5.250	4.400	kWe
Variation	1%								
Gearbox efficiency	98%								
Generator efficiency	97,5								
Case	Max. A	Optimum A	Max. B	Optimum B	Max. C	Optimum C	Max. D	Optimum D	
Inlet steam flow	32	27	32	27	32	27	32	27	Ton/h
Inlet steam pressure	60								bar(a)
Inlet steam temperature	420								°C
Enthalpy	3.228,79								kJ/kg
Bleed flow	2	2	-	-	2	2	-	-	Ton/h
Bleed pressure	16	16	-	-	16	16	-	-	bar (a)
Bleed temperature	263,6	265,3	-	-	263,6	265,3	-	-	°C
Enthalpy	2.952,26	2.956,32	-	-	2.952,26	2.956,32	-	-	kJ/kg
Exhaust flow	30	25	32	27	30	25	32	27	ton/h
Exhaust pressure	4				1,5				bar(a)
Exhaust temperature	155,0	157,9	154,6	157,3	127,4	127,4	127,4	127,4	°C
Enthalpy	2.755,66	2.762,59	2.754,67	2.760,97	2.650,42	2.659,12	2.648,85	2.656,63	kJ/kg
Turbine speed	10.500								rpm
Generator speed	1.500								rpm
Power in gearbox output shaft	3.827	3.163	3.980	3.265	4.694	3.827	4.898	4.031	kW
Power in generator terminal	3.750	3.100	3.900	3.200	4.600	3.750	4.800	3.950	kWe
Variation	1%								
Gearbox efficiency	98%								
Generator efficiency	97,5								

Vir: (Turbimaq)

Tehnični podatki parne turbine vključujejo v tehnične specifikacije izhodno moč, to je količina električne energije ali mehanskega dela, ki ga lahko proizvede parna turbina. Pretok pare je količina pare, ki lahko teče skozi turbino na časovno enoto. Tlak in temperatura pare sta pogoja, pri katerih para vstopa in izstopa iz turbine. Učinkovitost je merilo, kako učinkovito turbina pretvarja toplotno energijo v mehansko. Hitrost rotorja je hitrost, s katero se vrti rotor turbine v obratih na minuto. Mere in teža opisujejo fizično velikost in težo turbine, vključno s premerom in dolžino rotorja ter težo celotnega sklopa. Hladilni sistem se nanaša na metodo, ki

se uporablja za hlajenje turbine med delovanjem, kar je potrebno za preprečitev pregrevanja in poškodbe strojev in elementov stroja. Hladilni sistem se lahko razlikuje glede na zasnovo turbine in vrsto uporabljene delovne tekočine. Mazalni sistem se uporablja za mazanje površin, kot so drsni ležaji med gredjo in ohišjem parne turbine in so lahko prisilni ali integrirani mazalni sistemi. Nadzorni sistem se nanaša na elektronske in mehanske sisteme, ki se uporabljajo za nadzor delovanja turbine, vključno z regulacijo hitrosti, nadzorom temperature in varnostnimi funkcijami.

V našem primeru so tehnični podatki parne turbine tipa RT 400 prikazani v tabeli 3, kjer lahko izberemo naslednje. Da je tip turbine protitlačna z obliko horizontalne montaže gredi. Navedene so hitrosti obratov gredi med delovanjem, in sicer nazivna, mehansko varovana oz. maksimalna dovoljena hitrost in hitrost, pri katerem pride do prisilne zaustavitve parne turbine. V tabeli je navedeno, kakšen je sistem vhodnih ventilov, katere vrste je nadzorni sistem obratovanja turbine, kakšen je mazalni sistem parne turbine, kakšni so ležaji gredi parne turbine ter sistem tesnjenja in nazivne temperature in tlaka delovanja parne turbine. (Maquinas, projektna dokumentacija Turbine Model RT400, 2021)

Tabela 3: Tehnični podatki turbine RT400

STEAM TURBINE TECHNICAL DETAILS

Turbine Size	RT400E
Type	Reaction Back-Pressure
Casing Partition	Horizontal
Nominal Speed	10.500
Mechanical Trip Speed	11.550
Electric Trip Speed	11.760
Control Valve System	Multi-valve
Automatic Control Valve for Inlet Steam	02
Automatic Control Valve for Extraction	N.A.
Speed Control System Type	Electronic
Control System Manufacturer / Model	Woodward 505
Signal Converter Manufacturer / Model	Woodward CPC-II
Emergency Trip Valve System	Hydraulic
Lube and Control Oil System	Pressurized
Radial Bearing	Hydrodynamic (tilting pad)
Thrust Bearing	Hydrodynamic (tilting pad)
Steam Seal System	Labyrinths
Casing Design Pressure	63 barg
Casing Design Temperature	500 °C

Vir: (Turbimaq)

4.2 Konstruktivski podatki

Turbimaq večstopenjska reakcijska protitlačna turbina RT400E ima eno impulzno stopnjo in različne reakcijske stopnje, zasnovana za visoko učinkovitost in maksimalno zanesljivost. Ohišje turbine je zgrajeno iz litega jekla, razdeljeno na dva dela z vodoravnim spojem ohišja. Ohišje je podprto na podlago z dvema podstavkoma, ki sta simetrično razporejena po geometrijski sredini turbine. Dovodni in odvodni priključki vodne pare so v spodnjem delu ohišja, v vodoravni orientaciji priključnih spojev. Vstopno ohišje pare je izdelano iz jeklene litine. Vstopni regulacijski ventili so nameščeni na vstopnem delu in jih poganjajo hidravlični servoventili proizvajalca Turbimaq. Blok ventilov za nadzor ekstrakcije je dodan zgornjemu ohišju turbine in ga poganja hidravlični servoventil. Elektronski nadzor sistem hitrosti delovanja turbine izdeluje Woodward model 505D, ki pošilja signal hidravličnim servoventilom. Pretvornik elektrohidravličnega signala (CPCII), ki ga oddaja Woodward, pretvori signal elektronskega regulatorja v signal hidravličnega tipa in omogoča komunikacijo regulatorja in servoventilov.

Zasilni sistem za regulacijo vstopnih ventilov in izstop deluje hidravlično v naslednjih pogojih:

- mehanska prekoračitev hitrosti,
- izklop v sili s strani operaterja,
- električna prekoračitev hitrosti,
- električni izklop za prekoračitev hitrosti v sili,
- električna prekoračitev hitrosti (Protech 203),
- padec tlaka v oljnem mazalnem sistemu,
- previsoka temperatura drsnih ležajev rotorja,
- previsoka temperatura drsnih ležajev gonila,
- prekoračitev aksialnih premikov rotorja / meritev vibracij – (BN3500),
- prekoračitev vibracije parne turbine – (BN3500),
- prekoračitev vibracije gonila – (BN3500),
- prekoračitev vibracije generatorja – (BN3500),
- elektro generator nizke frekvence.

Zasilni sistem turbin Turbimaq je redundinčen ali podvojen, regulacijski ventil lahko tudi blokira dovod pare v katerem koli od zgoraj navedenih dogodkov. Rotor je izdelan iz visokokakovostne zlitine, iz toplotno obdelanega kovanega materiala. Rotor je dinamično uravnotežen pri veliki hitrosti v skladu z mednarodnimi standardi. Lopatice, ki usmerjajo pot pare čez turbino, so sestavljene iz statorskih in vrtljivih lopatic (lopatič rotorja). Ekspanzijske šobe prve stopnje, nameščene v parni komori, so impulznega, vse ostale pa so reakcijskega tipa. Ležaji so izdelani iz ogljikovega jekla z belo kovinsko prevleko, pripravljeno za uporabo pri velikih hitrostih. Tesnjenje med parnim delov in okolico se izvaja z labirintnimi tesnili. Rezila iz nerjavečega jekla so nameščena na pušo in imajo v povezavi z gredjo rotorja padec tlaka za uhajanje pare. Parno tesnjenje med vsako stopnjo je doseženo z višjimi in nižjimi deli, strojno obdelanimi na gredi z zunanjim labirintom, ki je sestavljen na njej. Oljno tesnilo ležajev je izvedeno z labirintnimi tesnili, vgrajenimi v aluminijevo ohišje. Vsi parni deli, ki dosežejo 50 °C ali več, so pokriti z odstranljivo toplotno izolacijo za zaščito in preprečevanje izgube temperature skozi ohišje. Raven hrupa parne turbine je v skladu z ISO3740 in VDI2159 za meritve na razdalji 1 metra, brez upoštevanja okolijskih pogojev, ≤85 dB(A). Merila, uporabljena za mehanske vibracije, morajo slediti zahtevam ISO10816 del 3, skupina 1 – cona A/B. Mejne vrednosti vibracij so 2,3 mm/s za toge ležaje ali 3,5 mm/s za drsne ležaje.

Uporabljeni materiali za izdelavo glavnih elementov parne turbine so prikazani v tabeli št. 4. Vsi materiali so prikazani oz. specificirani po ASME standardu. (Maquinas, projektna dokumentacija Turbine Model RT400, 2021)

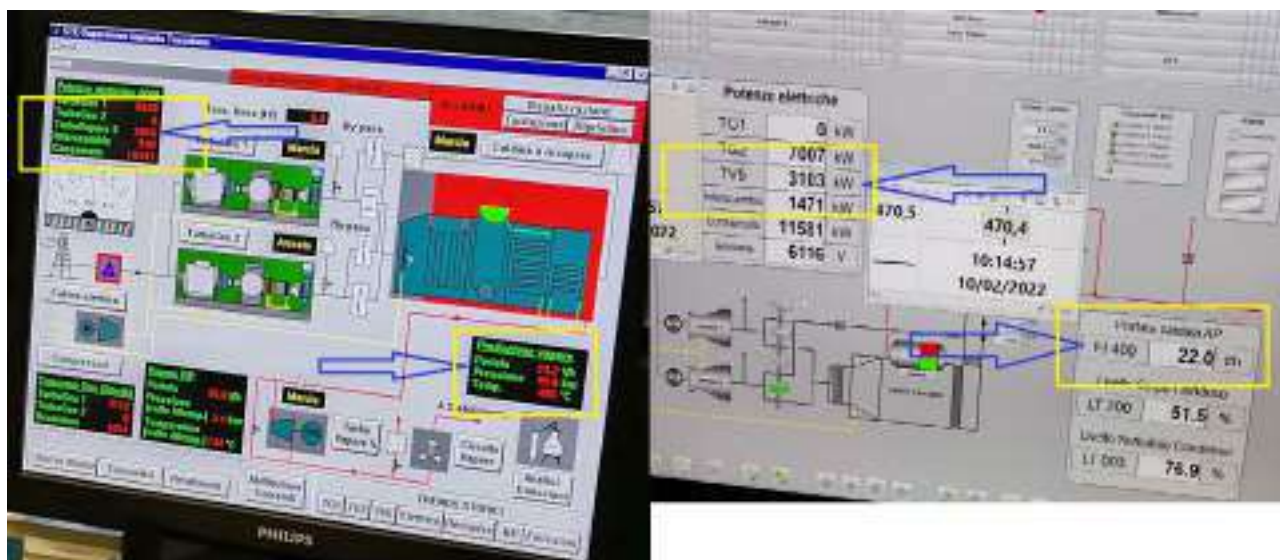
Tabela 4: Izbira glavnih materialov komponent turbine RT400

High Pressure Casing	G17CrMoV5-10
Valve Body	
Low Pressure Casing	HOLD
Nozzle Rings	
Rotor	28CrMoNiV4.9
Blades	X22CrMoV12-1
Blade Carrier / Stator Blades	ASTM A217 WC6
Bearings	AISI 1020
Bearings Coating	White Metal – ASTM B.23 Gr.2
Metalic Baseplate	ASTM A 36

Vir: (Turbimaq)

4.3 Učinkovitost turbo-generatorskega postrojenja

Termodinamična učinkovitost novega turbo-generatorskega postrojenja bo prikazana na podlagi izračuna upoštevajoče vhodne veličine in upoštevanih izgub na sistemu. V tabeli 5 je določena učinkovitost turbo-generatorskega postrojenja s 84,47 %. Tukaj se izpostavlja teoretična učinkovitost novega postrojenja v primerjavi z opremo, ki je bila zamenjana in je imela manjši izkoristek oz. manjšo učinkovitost pri enakih vhodnih pogojih vodne pare. Učinkovitost zamenjanega postrojenja v primerjavi z novim je le nenatančno prikazana na sliki 22, kjer je na levi sliki prikazano zamenjano postrojenje in je razvidna proizvedena električna energija 2.876 kW ob vhodnem pretoku vodne pare 24,2 t/h v primerjavi s prikazanim na desni sliki, kjer je v delovanju novo postrojenje in je razvidna proizvedena električna energija 3.103 kW ob vhodnem pretoku vodne pare 22,0 t/h. Tlak in temperatura se obravnavata kot enaki v obeh primerih.



Slika 22: Prikaz proizvedene energije starega in novega postrojenja

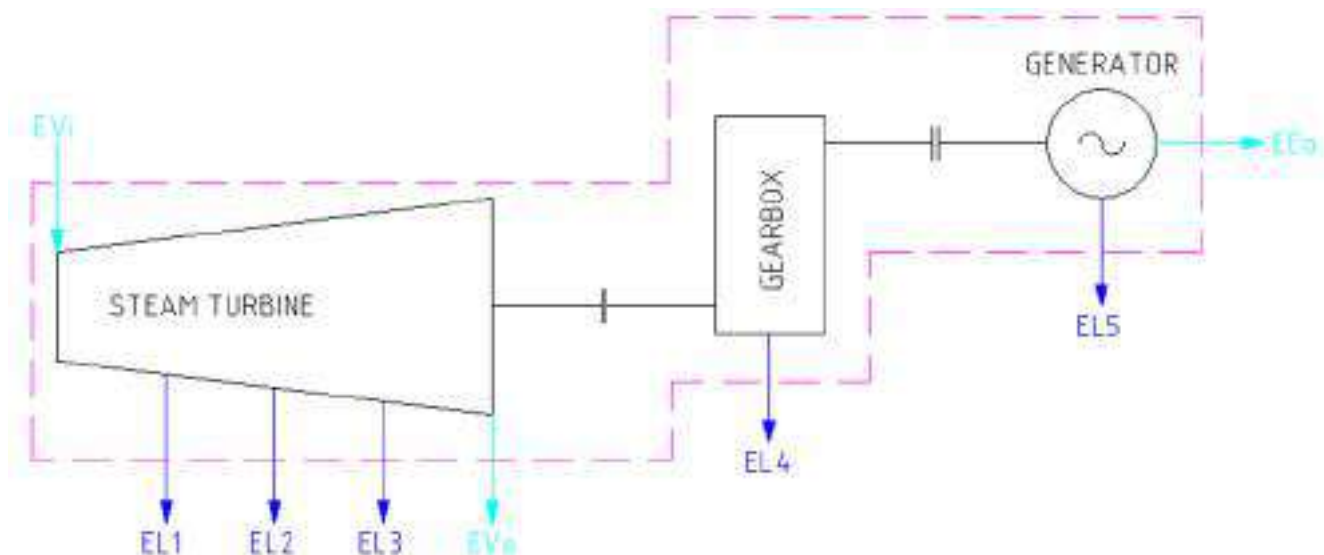
Vir: (Burgo Toscolano)

Tabela 5: Prikaz vhodnih veličin postrojenja in izračunana učinkovitost

Thermodynamic efficiency			design (Optimum B)
Inlet temperature	°C		470
Inlet pressure	bar a		60
Exhaust temperature	°C		169,2
Exhaust pressure	bar a		4
H inlet			3351,19
H exhaust	kJ/kg		2795,35
H ex isentropic			2693,16
delta H isentropic			658,03
delta H effective			555,84
Efficiency	%		84,47

Vir: (Turbimaq)

Koncept termodinamičnega ravnovesja, ki je osnova te analize, je koncept zakonov termodinamike (1., 2. in 3. zakon termodinamike) in temelji na načelu ohranjanja energije, ki pravi, da skupna količina energije v izoliranem sistemu ostane konstantna. Na osnovi tega načela lahko rečemo, da mora vsa energija, ki vstopi v sistem, iz njega izstopiti, na osnovi tega temeljnega termodinamičnega koncepta pa lahko uporabimo termodinamično ravnotežje v turbo-generatorskem sklopu.



Slika 23: Prikaz vstopnih in izstopnih veličin postrojenja

Vir: (Turbimaq)

$$EV_i = EV_o + EE_o + EL_1 + EL_2 + EL_3 + EL_4 + EL_5$$

EV_i = Energy entering the turbine into inlet steam

EV_o = Energy leaving the turbine by the exhaust steam

EE_o = Electric energy supplied by the generator

EL_1 = Thermal losses suffered by the turbine casing

EL_2 = Steam losses in the turbine due to leakage to the atmosphere

EL_3 = Mechanical Losses

EL_4 = Gearbox Losses (Reducer Efficiency)

EL_5 = Generator Losses (Generator efficiency)

Za izračun vzamemo parametre za našo turbino projekta Burgo Toscolano:

- $P_{inlet} = 60 \text{ bar (a)}$
- $T_{inlet} = 470 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- $P_{exhaust} = 4,0 \text{ bar(a)}$
- $Steam \text{ Flow} = 27.000 \text{ kg/h}$
- $Power \text{ Output} = 3.930 \text{ kW}$

Upoštevajoč vstopni tlak in temperaturo, dobimo vstopno entalpijo vodne pare.

$H_{inlet} = 3.351,19 \text{ kJ/kg}$

Pri tem je vstopna energija v parno turbino:

$$EV_i = H_{inlet} \times \text{Steam Flow} = 3351,19 \frac{kJ}{kg} \times 27000 \frac{kg}{h} = 90482130 \frac{kJ}{h}$$

$$EV_i = \frac{90.482.130}{3.600} = 25.133,925 \text{ kW}$$

Energija, ki jo proizvaja generator, je podana, pri čemer je:

$$EE_o = 3.930,00 \text{ kW}$$

Temperaturne izgube na ohišje bomo šteli kot zanemarljive, saj ima turbina novo izolacijo, torej:

$$EL_1 = 0 \text{ kW}$$

Zanemarljive bomo šteli tudi izgube pare v ozračje (labirintska tesnila itd.). Te izgube niso zanemarljive, vendar jih bomo obravnavali na naslednji način, saj predstavljamo celoten izkoristek vstopne energije:

$$EL_2 = 0 \text{ kW}$$

Za mehanske izgube turbine bomo upoštevali fiksno vrednost. Te izgube se nanašajo na trenje ležajev, pogon oljne črpalke, trenje sklopke gredi itd.

$$EL_3 = 50 \text{ kW}$$

Za menjalnik bomo upoštevali fiksni izkoristek ($\eta_{\text{gear}} = 98,0 \%$) in za poenostavitev izhajali iz proizvedene električne energije, torej:

$$EL_4 = (1 - 0,98) \times 3.930 \text{ kW} = 79 \text{ kW}$$

Upoštevali bomo fiksno učinkovitost generatorja ($\eta_{\text{gen}} = 97,5 \%$), torej:

$$EL_5 = (1 - 0,975) \times 3.930 \text{ kW} = 98 \text{ kW}$$

Če se vrnemo k prvotni enačbi ohranjanja energije in vstavimo vrednosti, pomeni:

$$EV_i = EV_o + EE_o + EL_1 + EL_2 + EL_3 + EL_4 + EL_5$$

$$25.133,925 = EV_o + 3.930 + 0 + 0 + 50 + 79 + 98$$

Izpeljemo enačbo:

$$EV_o = 25.133,925 - (3.930 + 0 + 0 + 50 + 79 + 98) = 25.133,925 - 4.157$$

$$EV_o = 20.976,925 \text{ kW}$$

To je energija, ki mora izstopiti na izstopu parne turbine, da se spoštuje načelo varčevanja z energijo. S to vrednostjo bomo dobili temperaturo na izhodu iz parne turbine.

$$H_o = \frac{EV_o \times 3.600}{\text{Steam Flow}} = \frac{20.976,925 \times 3.600}{27.000} = \frac{75.516.930}{27.000} = 2.796,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Z uporabo Mollierevega diagrama dobimo, da je temperatura izpušne pare za tlak 4,0 bar(a):

$$T_{\text{steam exhaust}} = 169,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ta temperatura in tlak na izstopu iz parne turbine sta zahtevana za nadaljnji proces uporabe vodne pare v industrijskem obratu in zahtevana s strani naročnika.

Zato mora biti temperatura izpušnih plinov turbine 169,9 °C ob upoštevanju načela varčevanja z energijo.

Zaradi merilnih negotovosti in izgub (EL1 do EL5) so dopustna majhna odstopanja do 2 °C.

To pojasnjuje, da moramo za analizo delovanja turbine in dokazovanja njene učinkovitosti izhajati iz termodinamičnega izračuna ob spoštovanju načela ohranjanja energije. Za to so primarno zbirni podatki:

- P_{inlet} ,
- T_{inlet} ,
- P_{exhaust} ,
- Steam Flow,
- Power Output.

In sekundarno:

- T_{exhaust} .

Pet primarnih podatkov (P_{inlet} , T_{inlet} , P_{exhaust} , Steam Flow and Power Output) je bistvenih za termodinamični izračun sistema. Imeti morajo najboljšo možno natančnost in zanesljivost.

Temperatura na izstopu iz parne turbine bo uporabljena za oceno, ali termodinamični izračun konvergira k izmerjeni temperaturi in mora imeti tudi najboljšo možno natančnost in zanesljivost.

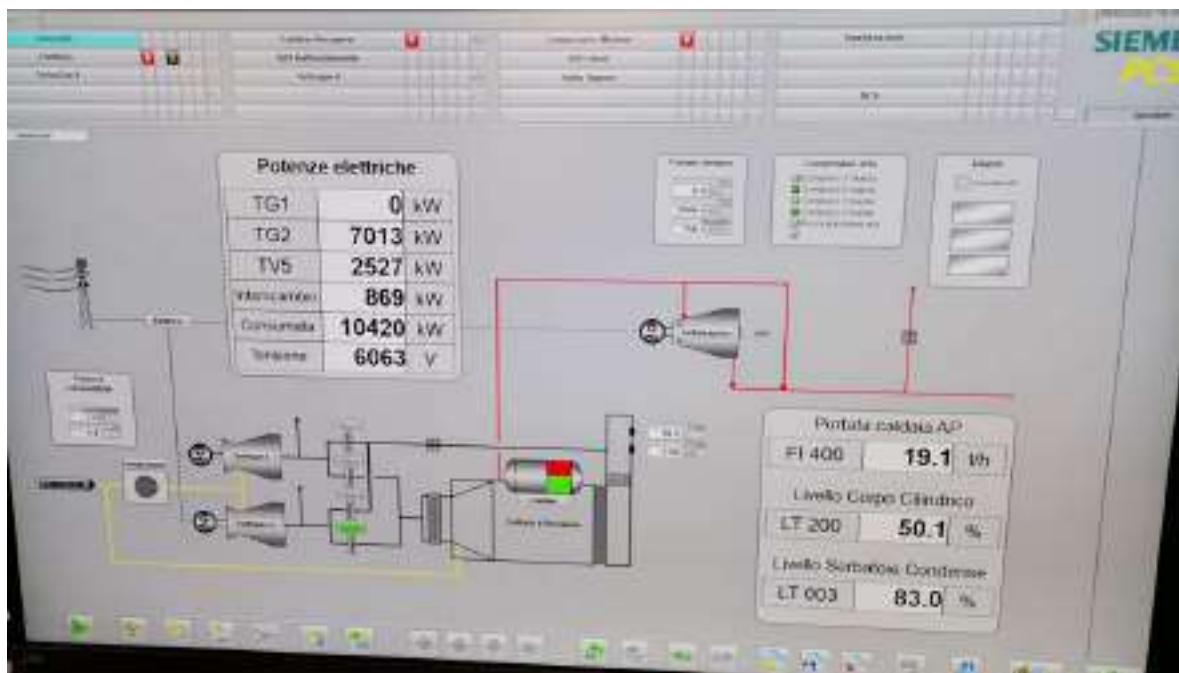
Če obstaja konvergenca, so meritve zanesljive. Če do konvergence ne pride, moramo meritve pregledati, saj mora obstajati vsaj ena nekonsistentna (nezanesljiva) meritev.

Pomembno je poudariti, da do te faze ne vidimo, ali lahko komplet doseže pričakovano učinkovitost. Podatke samo primerjamo, da preverimo zanesljivost meritev, tj. ali so meritve skladne s temeljnimi termodinamičnimi načeli.

Za namen dokazovanja učinkovitosti postrojenja bo izveden funkcionalni test. (Maquinas, projektna dokumentacija Turbine Model RT400, 2021)

4.4 Uporaba parne turbine

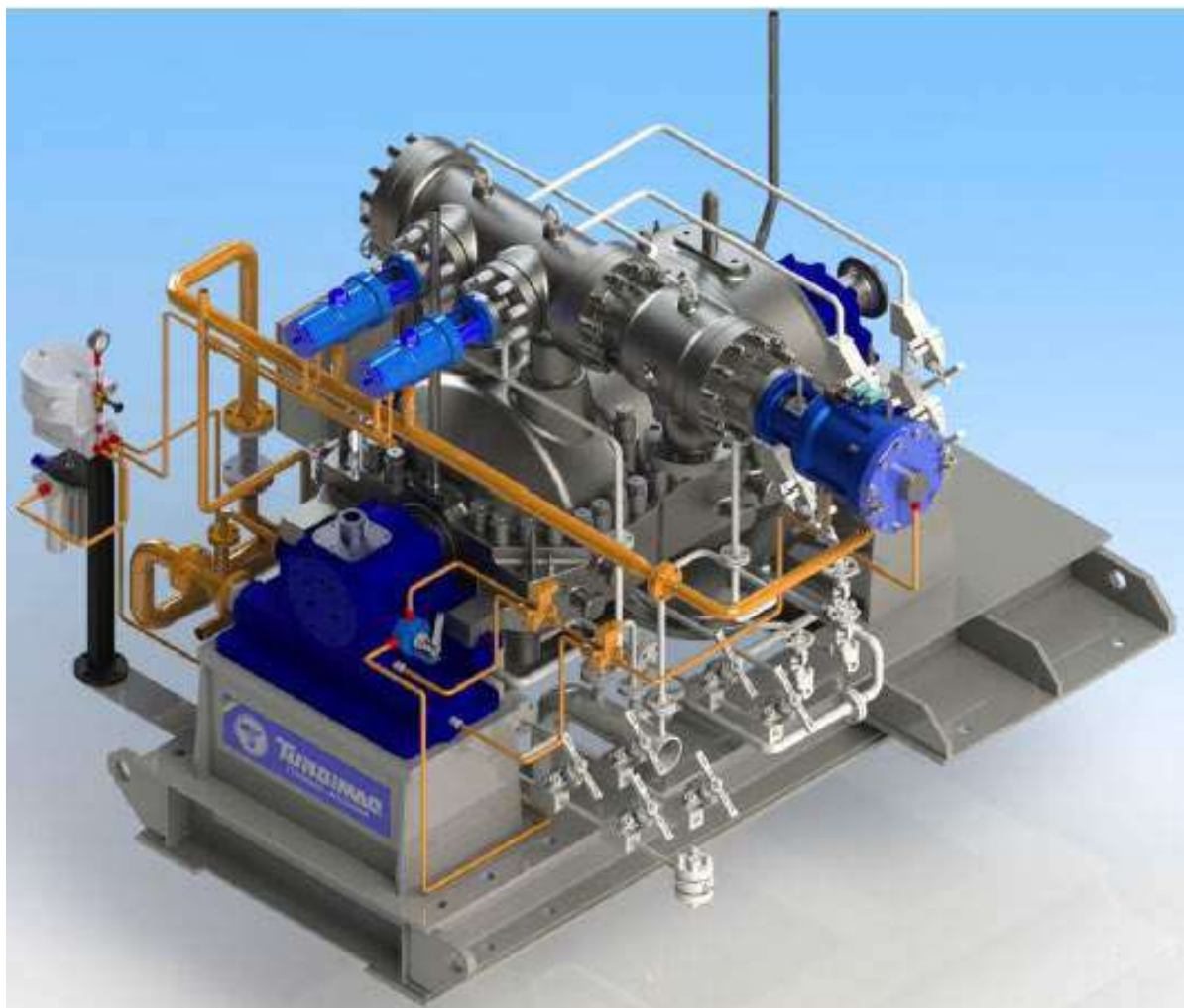
Parna turbina, ki je predmet diplomskega dela, je namenjena pogonu električnega generatorja v sklopu turbo-generatorskega postrojenja. Namen menjave parne turbine in postrojenja je bil povečati učinkovitost sistema pri izkoriščanju toplotne energije, ki je pridobljena v sklopu kombiniranega cikla v tovarni papirja. Primarno sta v tovarni inštalirani dve plinski turbini za pogon električnih generatorjev nazivne moči 7,5MW. Na sliki številka 24 je prikazana grafika nadzornega sistema v nadzorni sobi elektrarne, kjer je razvidno, da imamo poimenovana dva sklopa plinskih turbin s pripadajočim generatorjem z oznakama TG1 in TG2 ter parno turbino s pripadajočim generatorjem z oznako TV5.



Slika 24: Shematski prikaz kombiniranega cikla tovarne

Vir: (Burgo Toscolano)

Proizvodnja vodne pare sledi iz izmenjevalca toplote na izpušnem sistemu plinskih turbin ali ločenim grelnikom na izgorevanje metana za segrevanje vode in proizvodjanje vodne pare v kotlu. Z aplikacijo postrojenja je stranka dosegla višji izkoristek elektrarne v primeru uporabe izmenjevalca toplote pri uporabi plinske turbine. Vredno je omeniti, da je stranka hkrati z menjavo parne turbine zamenjala tudi eno od enot plinskih turbin za doseganje večje učinkovitosti. Parna turbina podjetja Turbimaq tipa RT400 je prikazana na sliki 25 v 3D-pogledu. (Maquinas, projektna dokumentacija Turbine Model RT400, 2021)



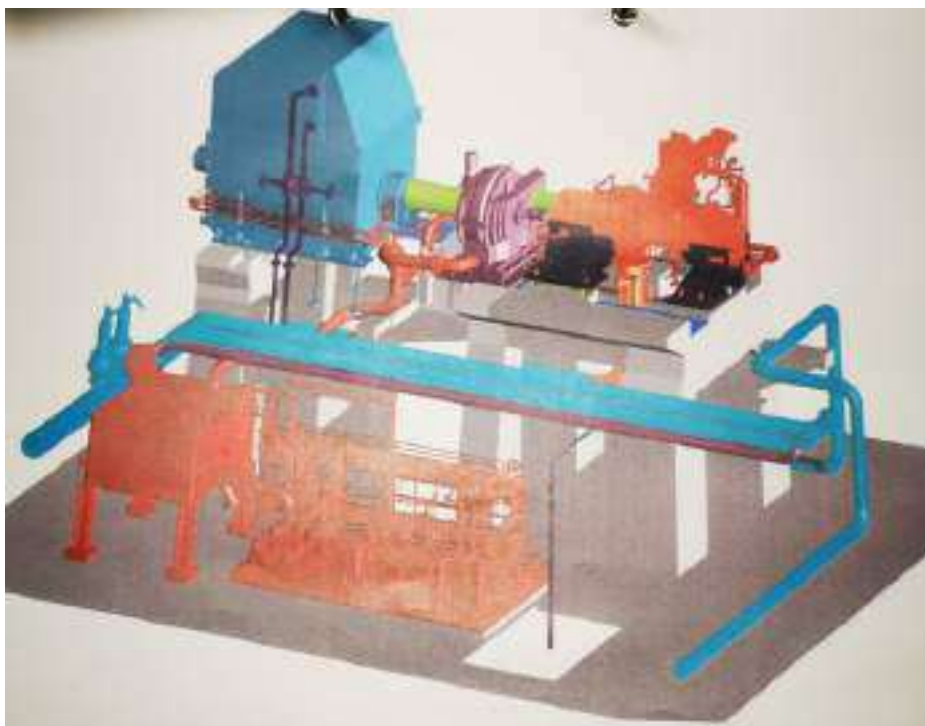
Slika 25: Parna turbina RT400 na podestu

Vir: (Turbimaq)

5 IZVEDBA PROJEKTA MENJAVE MANJ UČINKOVITE PARNE TURBINE TIPA IMPULZNE S TIPOM REAKCIJSKA ZA POVEČANJE UČINKOVITOSTI TURBO-GENERATORSKEGA POSTROJENJA

5.1 Predstavitev obstoječega postrojenja

Predmet projekta in obseg pogodbe je za podjetje Turbimaq Europe zajemal demontažo obstoječega postrojenja, pri čem je bila obstoječa parna turbina bila DePretto nazivne moči 9 MW. V obseg obstoječe opreme, ki je bila predmet zamenjave v projektu, spadajo parna turbina s pripadajočim gonilom in električnim generatorjem proizvajalca Leroy Somer, elektro oprema za kontrolo delovanja in mehanske opreme in oprema za priključitev opreme na omrežje imenovan medium voltage panel. Dela so zajemala tudi obnovo obstoječega mazalnega sistema in prilagoditev delovanja novemu postrojenju. Na sliki 26 je v 3D-sliki prikazana obstoječa oprema, ki je bila predmet zamenjave ali prilagoditve. V modri barvi je viden generator, v oranžni turbina in v rdeči mazalni sistem, ki se nahaja nivo pod lokacijo turbo generatorskega postrojenja.



Slika 26: Obstoječa oprema predmet predelave

Vir: (Burgo Toscolano)

Slika 27 prikazuje obstoječo parno turbino in gonilo, na katerem na strani višjega prenosa obratov je priklopljen generator. Na sliki je razvidno, da je na opremo pritrjenih več različnih inštalacij, katerih namen je dovajanje in odvajanje vodne pare, mazalnega olja, hladilne vode, elektro inštalacija za pogon elektromotorjev ter elektroinštalacija za kontrolo in nadzor signalov postrojenja. Turbo-generatorski sklop je montiran v zvočno izolirani kabini, ki ima inštalacijo za razsvetljavo prostora, odvajanje in prezračevanje prostora ter vrat z varnostnimi kljukami in pridržali.



Slika 27: Obstoječa parna turbina in gonilo

Vir: (Burgo Toscolano)

Obstoječa oprema je zajemala tudi tako imenovani gauge board, ki stoji ob postrojenju, vendar zunaj protihrupne kabine za odčitavanje pritiskov na sistemu vodne pare in prisiljenega mazalnega sistema. Odčitovalci so napajani s 24 Vdc in imajo prikazovalnik podatkov ter analogni izhodni signal. Analogni izhodni signal je priklopljen na nadzorni sistem na ravni PLC, ki zajema podatke in ustrezno uravnava delovanje. Zaščitni sistem oz. protection panel obstoječega postrojenja, ki prav tako stoji ob protihrupni kabini, je bil zamenjan, vendar je bila

komponenta za nadzor vibracij opreme proizvajalca Bentley Nevada tip 3500 prevzeta na novo opremo. Razlog je predvsem brezhibno delovanje obstoječe opreme in nižanje stroškov projekta oziroma naložbe. V enaki elektro omari, kot je oprema za nadzor vibracij, je montirana oprema za nadzor previsokih vrtljajev parne turbine, tako imenovani overspeed protection device proizvajalca Woodward. Na sliki 28 sta prikazana gauge board in elektro omara z zaščitno opremo postrojenja, ki je bila postavljena zunaj protihrupne kabine. V nadaljevanju se je lokacija za gauge board ohranila, vendar je bila elektro omara za zaščitno opremo postrojenja prestavljena v nadzorno sobo.



Slika 28: Panel inštrumentov in elektro omara za elektronsko zaščitno opremo

Vir: (Burgo Toscolano)

V nadzorni sobi se je nahajala oprema za nadzor delovanja postrojenja, ki je inštalirana v elektro omarah in zajema nadzorni računalnik na nivoju PLC, nadzor vrtljajev in ostalih parametrov delovanja, imenovan Gouverment oz. guvernerski sistem. Le-ta je bil v celoti odstranjen in zamenjan z novo elektro omaro in novim nadzornim sistemom. Prav tako je v nadzorni sobi postavljena elektro omara za sinhronizacijo z javnim omrežjem proizvedene električne energije generatorja in nadzora delovanja v otočnem modusu. Na sliki 29 je prikazana obstoječa oprema

v nadzorni sobi, ki je bila v celoti zamenjana in je zajemala tudi položitev novih elektro inštalacij oz. kablov.



Slika 29: Elektro omara obstoječega postrojenja v nadzorni sobi

Vir: (Burgo Toscolano)

Mazalni sistem za prisiljeno mazanje drsnih ležajev parne turbine, gonila in generatorja se je ohranil, vendar so bila izvedena obnovitvena dela na glavnih elementih stroja ter v celoti obnovljena protikorozijska zaščita stroja. Sistem je bil nato ponovno zagnan in ustrezno ponastavljen, da je ustrezal potrebam novega postrojenja. Na sliki 30 je prikazan sistem, na katerem se vidijo tako oljne črpalke, rezervoar olja, filtri, temperaturni izmenjevalec in povezovalne cevi pred obnovo. (Europe, projektna dokumentacija: Toscolano CTE. Turn Key installation and start up of new turbine model RT400. Interno gradivo, 2021)



Slika 30: Obstoječi oljni mazalni sistem

Vir: (Burgo Toscolano)

5.2 Predstavitev opreme menjave postrojenja

Predmet zamenjave postrojenja je zajemal tako mehansko opremo kot elektro opremo in obnovitev sistema za prisilno mazanje drsnih ležajev opreme in visokega oljnega tlaka za regulacijo vstopnih ventilov parne turbine.

Mehansko opremo predstavlja turbo generatorski sklop, ki sestoji iz parne turbine, gonila in generatorja električne energije. Tehnični podatki parne turbine so bili predstavljeni v točki 4. Parna turbina je sestavljena iz glavnega elementa ohišja turbine, vstopnega zapornega ventila oz. glavnega zapornega ventila za zaustavitev v sili, vstopnih ventilov za dovod vodne pare in regulacijskega guvernerja, montažnega podesta, na katerem je nameščena turbina, in vzmetne sklopke za povezavo med gredjo turbine in gonila. Del parne turbine so tudi nameščeni instrumenti, kot so vibracijski senzorji na ohišju, temperaturna tipala na ohišji in senzorji za nadzor vrtljajev turbine. Drugi oz. vmesni element med turbino in generatorjem je gonilo proizvajalca Zanini Renk za prenos vrtljajev turbine, ki znašajo 10.500 min^{-1} na nazivne obrate generatorja, katerega znašajo 1500 min^{-1} . Gonilo je bilo ustrezno izbrano glede na razmerje med obrati, mehansko preneseno moč in navor. Na gonilo je nameščen tako imenovan obračalni motor, ki služi obračanju glavnih gredi postrojenja. Uporablja se pri ohlajanju ob zaustavitvi sistema in s tem se prepreči previs gredi zaradi temperaturnega krčenja ob ohlajanju. Tudi gonilo ima svoj neodvisni podest za montažo na mestu postrojenja in vibracijske ter temperaturne senzorje. Na gonilo je nameščena mehanska zobniška sklopka za prenos vrtljajev na generator. Tretji člen glavnega postrojenja je generator električne energije proizvajalca WEG, generator je najtežji in največji element turbo generatorskega postrojenja. Izbran je bil na podlagi zahtevane proizvodnje moči v tabeli, prikazani na sliki 22. Del generatorja je tudi podest, ki je bil izdelan iz dveh delov, levega in desnega, s pritrdilnimi luknjami, da se prilagajajo obstoječim sidrnim vijakom in prav tako novi opremi. Generator nima nameščenih le cevi za mazalni sistem dovodne in povratne, ampak prav tako cevi za dovod vode za hlajenje statorja generatorja, kar je en ključnih dejavnikov za visoko učinkovitost generatorja. Največje izgube na generatorju so temperaturne v primeru pregrevanja. Na generatorju so nameščeni tudi senzorji za kontrolo vibracij in temperature.

Mazalni sistem ni bil zamenjan, ampak so bila opravljena mehanska popravila pri obnovi oljnega mazalnega sistema za zagotavljanje dolgoročnega nemotenega delovanja sistema. Stroj je obratoval 20 let, a se je naročnik zaradi optimizacije stroškov odločil, da sistem le obnovi in ne zamenja. Mazalni sistem sestoji iz glavnega podesta sestavljenega iz konstrukcijskih H in I

nosilcev ter prekrito s proti drsno pokrivno pločevino. Na podestu so montirani rezervoar olja, glavna in pomožna oljna črpalka za prisilno mazanje, ki olje tlači skozi cevovod sistema čez hladilni sistem olja, filtrni sistem olja in regulacijski izhodni ventil. Na glavni liniji je izveden dodatni odvzem za napajanje kontrolnih dveh črpalk, pri čemer je ena glavna in druga pomožna. Glavni namen teh črpalk je zagotavljanje višjega tlaka za regulacijo večpotnih hidravličnih ventilov, ki so del regulacije ali vstopnih ventilov vodne pare na parni turbini. Na novo je bila oljnemu sistemu dodana majhna črpalka, imenovana dvižna črpalka, katere izstopni tlak je 100 barov ter služi dvigu gredi od drsnega ležaja med zagonom in ustavljanjem postrojenja. Mehanska prilagoditvena dela so se izvajala tudi na povezovalnih ceveh med glavnimi tremi elementi postrojenja in mazalnega, kontrolnega, hladilnega in parnega sistema. Predvsem zahtevnosti pri prilagajanju in zamenjavi dela cevi za dovodno in odvodno paro so bile visoke, saj je zaradi izbranega materiala elementov in visokih termodinamičnih sil, ki krčijo in raztezajo elemente med delovanjem in ustavljanjem parne turbine, postopek treba izvesti v kontroliranem temperaturnem območju in izvajanju neporušitvenih testov. To pomeni, da je bilo lokalno območje varjenja predgreto in tudi po varjenju kontrolirano ohlajeno.

Elektro montažna dela so se nanašala na zamenjavo vseh dovodnih in odvodnih kablov iz postrojenja do kontrolne sobe, kjer se bodo nahajale elektro omare z opremo za nadzor in kontrolo delovanja postrojenja. V spodnjem nivoju stavbe bo montirana nova elektro omara za priklop dovodnih kablov iz generatorja preko elektro omare v omrežje. Za potrebe obračalnega motorja na gonilu postrojenja se montira elektro omara v ločenem prostoru za stikala in frekvenčne konverterje elektro motorjev, v kateri je nameščeno zagonsko stikalo s krmiljem in je povezano na glavno omaro v kontrolni sobi. Na sliki 31 je prikazano na novo montirano postrojenje s pripadajočo cevno in elektro inštalacijo. Z leve strani je razvidna parna turbina, pokrita z izolacijskim plaščem, na sredini je gonilo in na desni generator ter nekaj dodatnih slik opreme. (Europe, projektna dokumentacija: Toscolano CTE. Turn Key installation and start up of new turbine model RT400. Interno gradivo, 2021)



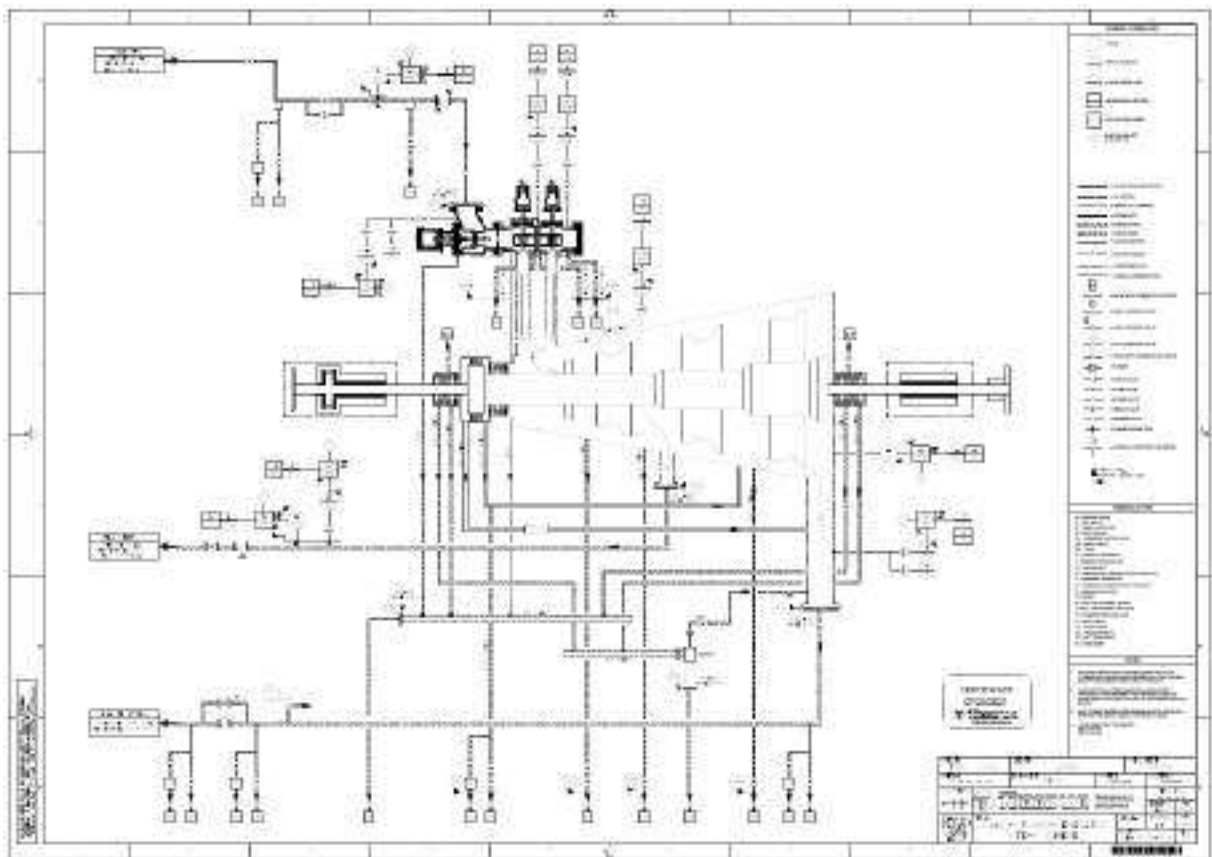
Slika 31: Novo glavno postrojenje

Vir: (Burgo Toscolano)

5.3 Funkcionalnost turbo-generatorskega postrojenja

Osnovni dokument za načrtovanje turbo-generatorskega postrojenja je po določitvi moči in izkoristkov ter glavnih komponent funkcionalna shema postrojenja. Funkcionalna shema ali v angleškem jeziku imenovana P&Id, kar pomeni piping and instrument diagram, je izhodiščni dokument, po katerem inženirji določijo obseg in tehnologijo za pomožne sisteme za zagotavljanje delovanja postrojenja. V to spadajo pomembni podatki za strojne inženirje, kot so instrumenti za zagotavljanje regulacije strojev, inštrumenti za zagotavljanje varnega delovanja stroja, komponente regulacije stroja, cevne povezave med posameznimi elementi, linije za dovod in odvod različnih tekočih in plinastih medijev in funkcionalni princip delovanja ob obratovanju kompletnega postrojenja. Za elektro inženirje so podane informacije o številu signalov, ki se morajo vključiti v nadzorni sistem delovanja. Temu primerno je treba vključiti signale v elektro omarah na I/O-karticah in fizičnih kablilih za ustrezen zapis funkcionalne logike delovanja ter nominalne in mejne vrednosti za obratovanje vsakega od sistemov.

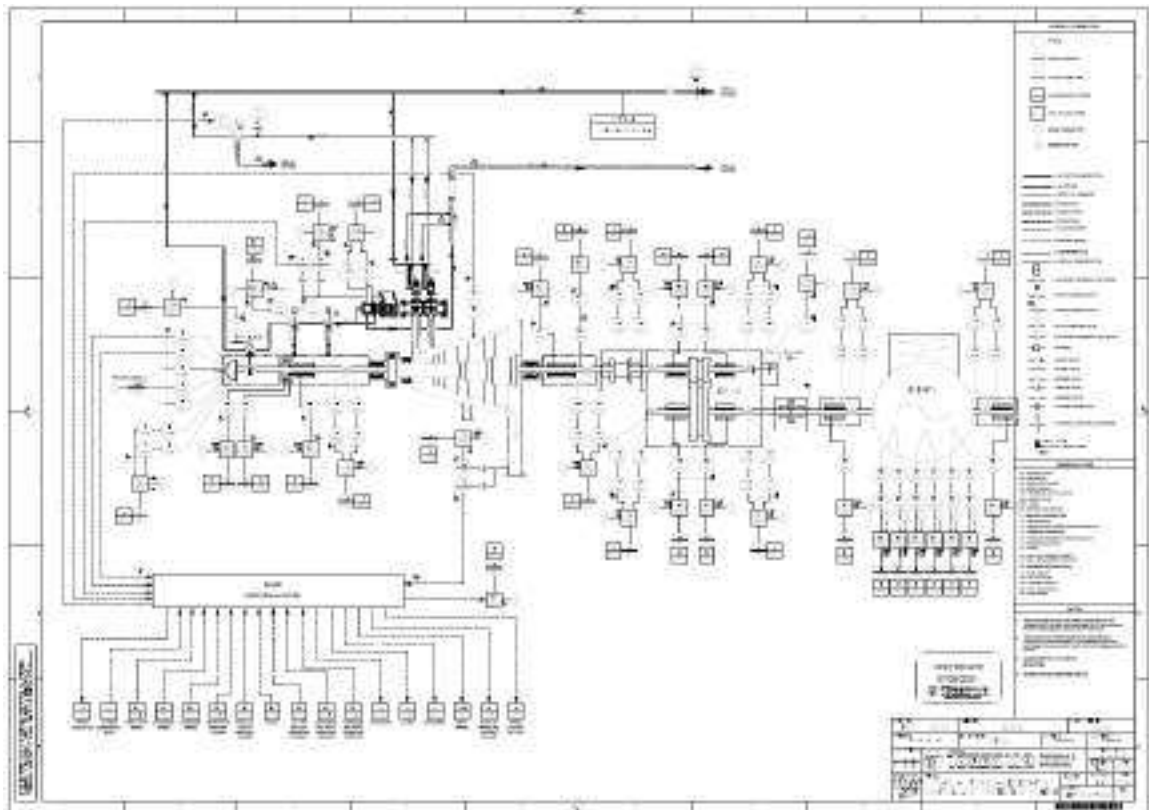
Slika 32 prikazuje funkcionalno shemo za pretok vodne pare v čez in iz parne turbine ter pripadajoče drenažne linije. Prikazana je linija dovoda vodne pare v sistem. Na dovodni liniji so prikazani zaporni ventil, nepovratni ventil, temperaturno tipalo ter mrežasti Y-filtrni element. Pred samo turbino so prikazani stop ventil in merilci tlaka vodne pare, sledita dva vhodna regulacijska ventila, ki sta regulirana čez guvernerski sistem za nadzor obratovanja turbine. Na shemi so razvidne ekspanzijske stopnje in izhodna linija, na kateri je prikazan nepovratni ventil. Glavna funkcija tega nepovratnega ventila je preprečitev povratnega toka, saj tovarna papirja lahko obratuje s samostojnim sistemom za proizvodnjo vodne pare. Na shemi so razvidne linije, ki se končajo kot izpusti v atmosfero. To so strojni inženirji določili povsod, kjer imamo določen kontroliran izpust pare kot na labirintskih tesnilih gredi in kjer se lahko vodna para akumulira in kondenzira. V ta namen imamo pred drenažami ali izpusti montirane izpuščevalce vodne pare, da preprečijo kondenzacijo vodne pare v njenih ceveh. Na shemi je prav tako označena stabilna ekstrakcijska linija, na kateri sta montirana nepovratni in zaporni ventil ter toplotno tipalo in merilec tlaka.



Slika 32: Funkcionalna shema vodne pare

Vir: (Turbimaq)

Na sliki 33 so prikazani vsi elementi in inštrumenti, ki služijo zagotavljanju in varovanju optimalnega delovanja postrojenja. Kot je razvidno, so prikazani parna turbina, gonilo in generator. Na strani parne turbine so razvidni merilci hitrosti, ki se med seboj izključujejo v delovanju. V primeru izpada enega dva še vedno zadovoljujeta dovolj veliko raven varnosti nadzora hitrosti za neprekinjeno delovanje. Na vseh koncih gredi so prikazani tako vibracijski merilniki kot temperaturni merilniki, ki v primeru preseganja mejnih vrednosti postrojenje ustavijo. Na sliki 34 je prikazan primer, kako se funkcionalna shema v praksi naknadno prenese na za operaterja namenjen HMI in prikazuje signale za zaščito opreme. V logiki na nivoju PLC-računalnika se nastavijo mejne vrednosti, pri katerih, če so dosežene, prejme operater najprej alarmni signal, višja in naslednja stopnja pa je zaustavitev postrojenja.



Slika 33: Funkcionalna shema zaščitnih signalov

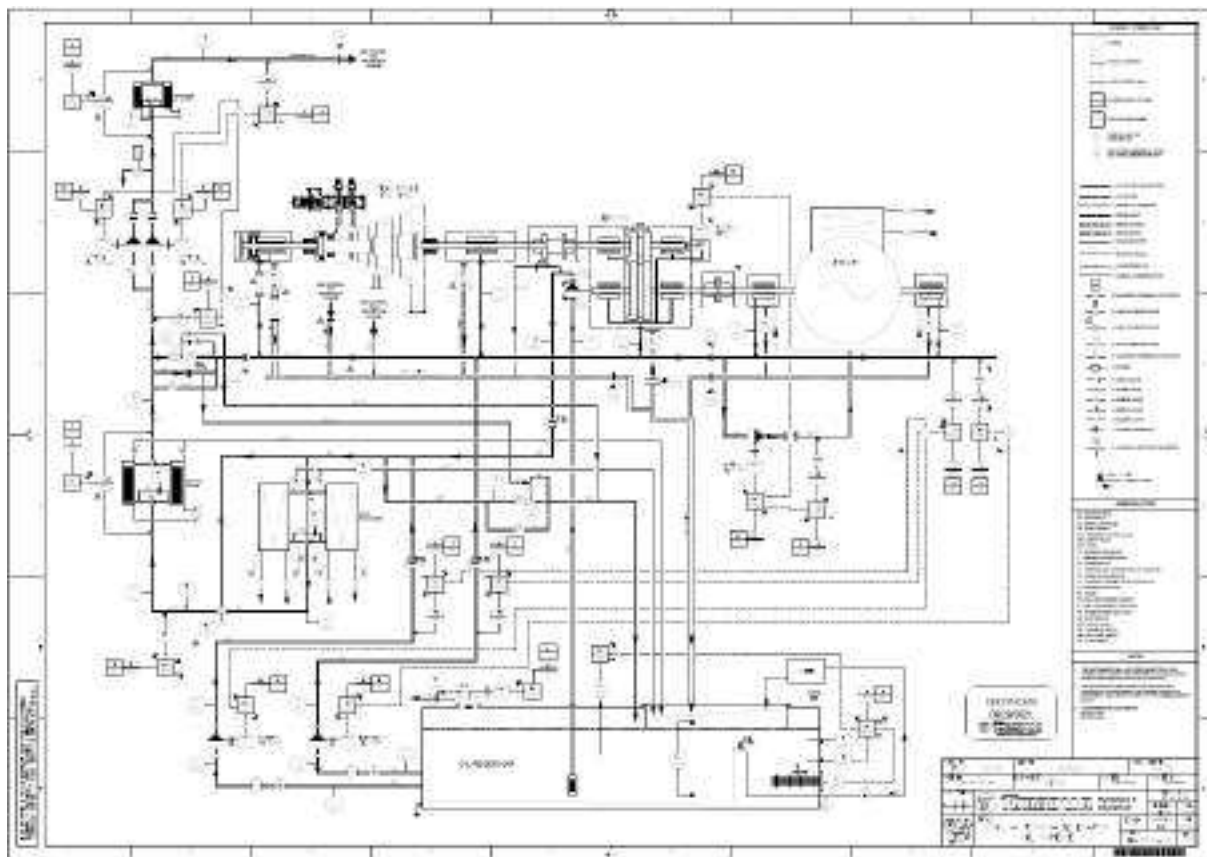
Vir: (Turbimaq)



Slika 34: Funkcionalna shema in odčitavanje signalov na HMI

Vir: (Turbimaq)

Na sliki 35 je prikazana funkcionalna shema oljnega mazalnega in kontrolnega sistema. Na shemi so prikazane vse tri glavne komponente in dovodi ter odvodi cevi. Olje se na območja ležajev pod tlakom dovaja in nato se po povratnih ceveh vrača v zbirni rezervoar, iz katerega črpalke črpajo olje. Črpalke olje po sklenjenem tokokrogu hladijo, filtrirajo in regulirajo masne veličine le tega. Na shemi so prikazani tudi regulacijski, zaščitni in tlačni signali potrebni za obratovanje sistema. Vsi analogni in digitalni signali so fizično s kablji priključeni na elektro omaro in vključeni v regulacijsko logiko postrojenja.



Slika 35: Funkcionalna shema oljnega sistema

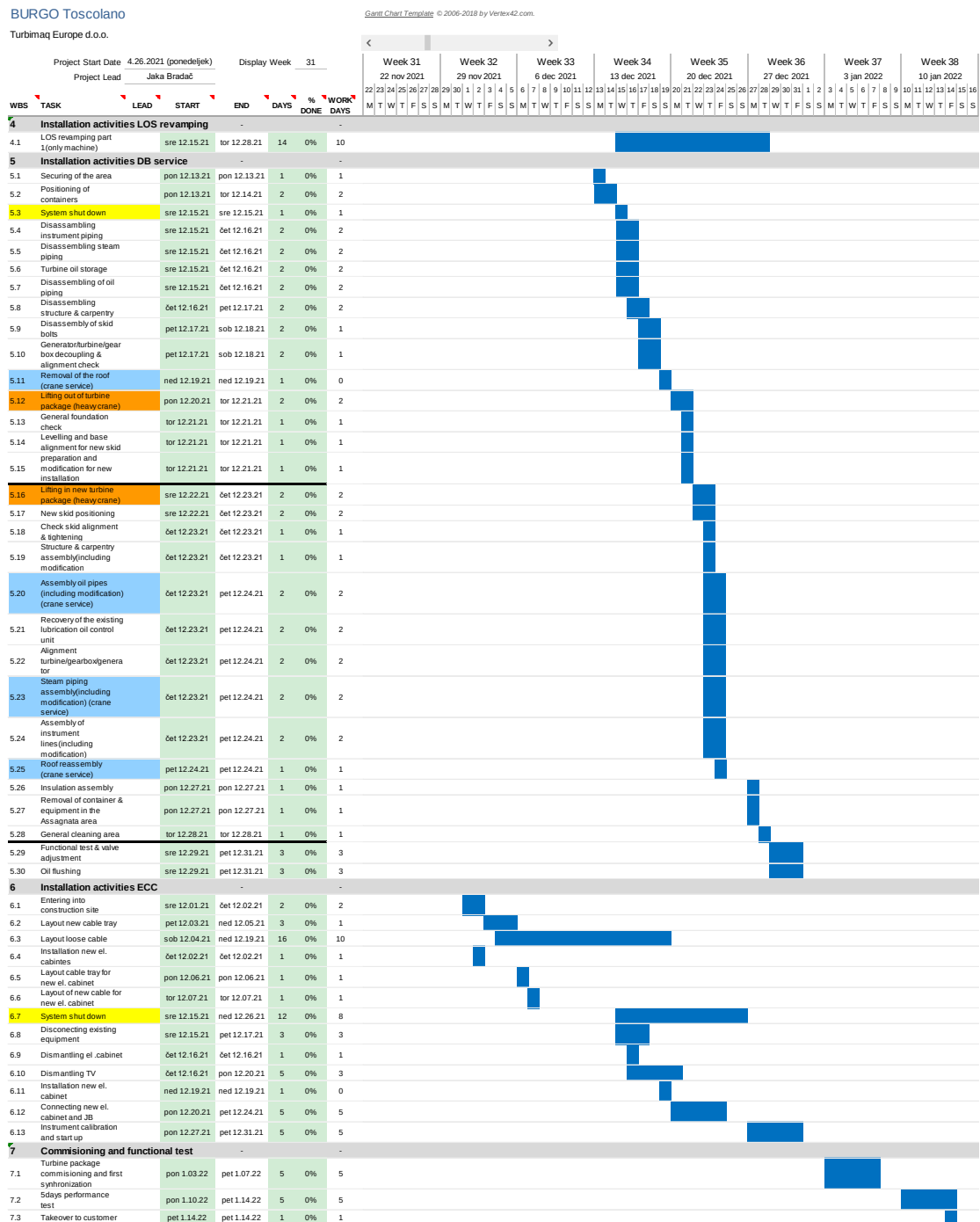
Vir: (Turbimaq)

Treba je dodati, da funkcionalne sheme služijo inženirjem, vendar imajo tudi zelo velik pomen za projektno vodenje, saj vodja projekta, v tem primeru jaz, lahko razume obseg projekta in tudi pri svojih opravilih preverja dejavnosti na podlagi shematskega obsega. Pri montažnih delih, predvsem kadar se predelujejo obstoječi sistemi, služi za pravilno določitev povezovalnih linij, če načrti niso bili izometrijsko izrisani, ter za montažo hidravličnih signalnih linij kot identifikacijo posameznih predhodno montiranih elementov na opremi kot pri njihovi montaži.

5.4 Časovno načrtovanje projekta

Projekt zamenjave turbo-generatorskega postrojenja v tovarni Burgo Toscolano je bilo časovno zahteven, saj so morala biti dela izvedena v času zmanjšane aktivnosti tovarne v obdobju rednih vzdrževalnih del v tovarni papirja konec vsakega koledarskega leta. Obdobje menjave postrojenja je bilo izbrano na podlagi predvidevanj najmanjših izgub ob nedelovanju turbo generatorskega postrojenja. Tovarna papirja je velik porabnik električne energije, zaradi česar je elektrarna tudi del procesa. Če kombiniran cikel tovarne ni v popolnem delovanju, tovarna papirja deluje s finančno izgubo. Posledično je stranka, ko je konec meseca februarja 2021 oddala naročilo za opremo, demontažna dela obstoječe opreme, montažna in prilagoditvena dela nove opreme ter elektro opreme predvidela v terminu od 13. do 31. decembra ter zagon in predajo opreme stranki do 15. januarja 2022. Časovni plan je imel svoje zahtevnosti, saj je pri projektu sodelovalo več podjetij in dobaviteljev opreme pod okriljem podjetja Turbimaq Europe. Izdelava in dobava parne turbine, gonila in generatorja je bila izvedena pri treh proizvajalcih v Braziliji. Elektro opremo je načrtovalo in zgradilo podjetje ECC iz Italije, montažna dela in predelavo obstoječe opreme pa podjetje DB Servis iz Italije. Med izvedbo projekta in časovnimi usklajevanji je bila prva prioriteta oprema, ki jo je bilo treba pripeljati na montažno mesto v časovnem okvirju. Parna turbina in gonilo sta glede na časovnico zamujala, zato je prišlo do sprememb pri načrtovanju prevoza. Vzrok zamude so bile zamude pri končanju parne turbine in testiranja le-te v tovarni. Dodatni zapleti so se pojavili zaradi kovidnih omejitev za vstop nadzornikov iz Brazilije, ki so bili predvideni za tehnično svetovanje ob montaži in zagonu opreme. Kot projektni vodja sem odšel v Brazilijo z namenom pregleda dejanskega stanja opreme ob odpremi in izobraževanja v primeru, da nadzorniki ne bi imeli dovoljenja za vstop v Italijo in na mesto montaže. Med usklajevanji in iskanjem rešitev smo se odločili, da se prvotni načrt za transport opreme iz Brazilije v Italijo z ladjo mora prilagoditi. Tako smo namesto ladijskega prevoza uporabili letalski prevoz, kar projektu dodalo še posebno zahtevnost. Posledično so se stroški projekta zvišali za nekaj deset tisoč evrov. Montažna dela na projektu so se začela po načrtovanem časovnem planu in bila v okviru tega tudi zaključena. V projektu ni prišlo do zamude ne pri dobavah ne pri izvedbi na terenu. Na sliki 36 so prikazani dnevi in obseg časovnega načrta, in sicer le za dela na terenu. To je bilo mogoče le zaradi sodelovanja vseh vpletenih v projekt in zelo visoke ravno koordinacije projekta. Pri izvedbi so se pojavile dodatni večji zapleti, kot npr. predelava parne cevi na izpustu parne turbine, obseg predelave obstoječih cevi oljnega sistema, predelava podestov in podlage postrojenja,

nepripravljen napajanje DC-toka za emergency oljno črpalko in nekatere manjše, vendar pomembne dejavnosti in elementi.



Slika 36: Časovni načrt projekta

Vir: (Turbimaq Europe)

Montažna dela so bila končana nekoliko pred rokom, tako da so se zagonske storitve začele tri dni pred predvidenim rokom. Posledično je bila parna turbina pred predvideno časovnico v

delnem obratovanju. (Europe, projektna dokumentacija: Toscolano CTE. Turn Key installation and start up of new turbine model RT400. Interno gradivo, 2021)

5.5 Izvedba demontažnih in montažnih del na lokaciji

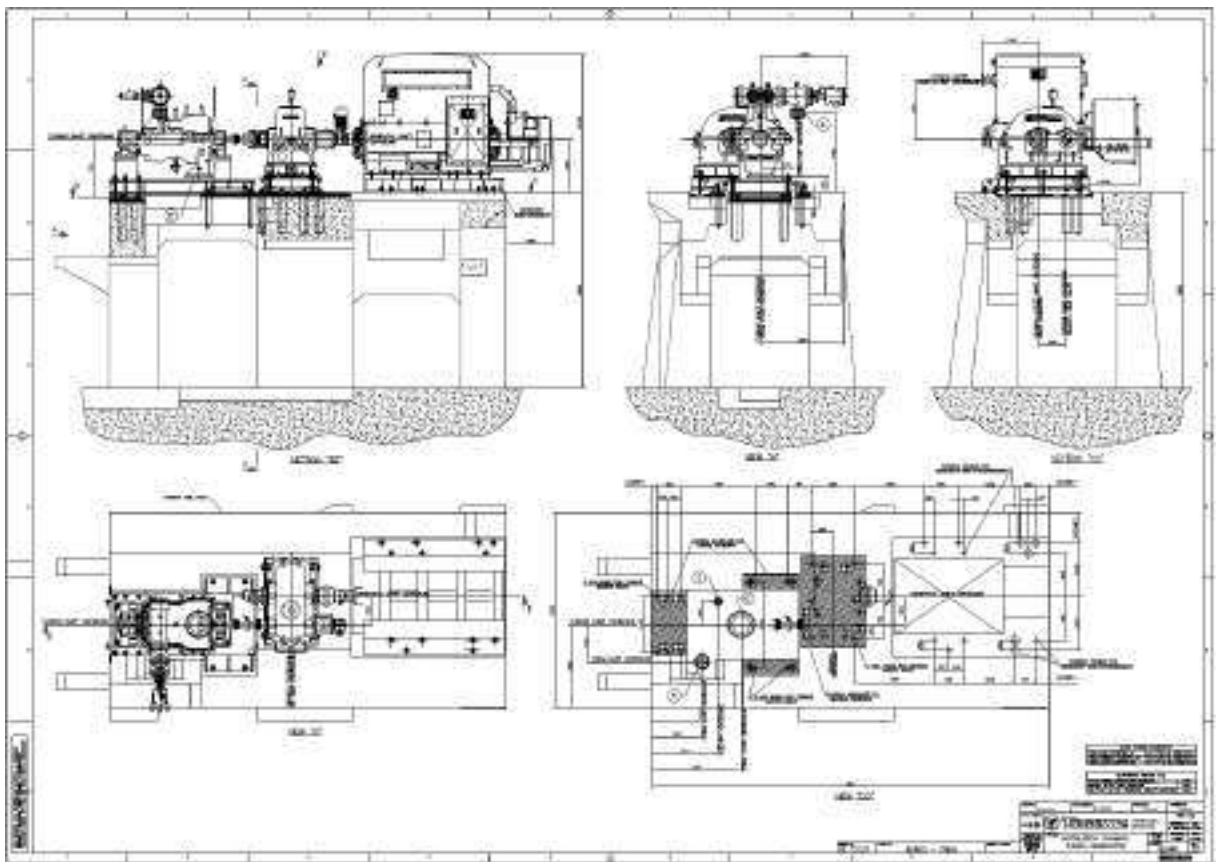
Demontaža mehanska dela so se izvajala pod nadzorom podjetja DB Servis, ki je izvedlo tudi dvig obstoječe opreme iz stavbe. Najtežji element je bil električni generator znamke Leroy Sumer, teža katerega je bila 24.540 kg. Dela dviga opreme iz in v prostor montaže so se izvedla skozi streho tovarne, ki je bila za ta namen začasno odstranjena. Dvigalo, katerega nazivna dvižna moč je bila 60 t, je opremo dvignilo na višino osmih metrov čez rob stavbe. Na sliki 37 je prikazano dviganje enega izmed glavnih elementov, pri čemer je razvidna zahtevnost zaradi višine. Podjetje, ki je izvajalo dvig, je v ta namen pripravilo študijo dviga, upoštevajoč težo opreme, karakteristike dvigala, omejen prostor za postavitev dvigala in lastnosti okolice.



Slika 37: Dvig opreme iz montažnega prostora

Vir: (Turbimaq Europe)

Po demontaži obstoječe opreme in odstranitvi z montažnega mesta so se izvedla meritvena dela za primerjavo elementov za pritrnitev nove opreme na mesto in dejanskih mer obstoječih sidrnih vijakov. Podjetje Turbimaq je na podlagi obstoječe dokumentacije izdelalo montažne podeste tako, da se pritrditvene luknje za sidrne vijake ujemajo z obstoječimi. Na sliki 38 je prikazan načrt pripravljen na podlagi dimenzijski načrtov glavnih komponent in pozicijo obstoječih sidrnih vijakov. Ker se je oprema dimenzijsko razlikovala od obstoječe predvsem v smislu manjših dimenzij, so se izdelali konstrukcijski prilagojeni adapterji ali podesti s prilagojeno velikostjo in pritrditvenimi luknjami.



Slika 38: Načrt montaže glavnih elementov in pritrditve na podlago

Vir: (Turbimaq)

Po pregledu obstoječe podlage za montažo in delno obnovitvenih del na betonski podkonstrukciji so se elementi novega postrojenja dvignili čez odprto streho stavbe na mesto montaže. Tabela 6 prikazuje opis, težo in dimenzije glavne opreme, ki je bila obenem tudi najtežja in najzahtevnejša za dvig. Zaplet se je pojavil pri generatorju, saj nekateri sidrni vijaki niso ustrezali pozicijam lukenj na podestu, zato so bila potrebna prilagoditvena dela in večkratni dvig v in iz stavbe. (Europe, projektna dokumentacija: Toscolano CTE. Turn Key installation and start up of new turbine model RT400. Interno gradivo, 2021)

Tabela 6: Dimenzije in teže glavnih montažnih elementov

Project name: Burgo Toscolano

Steam turbine		
	Weight	7.500kg
	Dimension(mm)	2.900 x 1.850 x 2.200*
Generator		
	Weight	19.900kg
	Dimension(mm)	4.450 x 2.000 x 2.400**
Gear box		
	Weight	6.000kg
	Dimension(mm)	2.000 x 2.100 x 2.000

Vir: (Turbimaq)

5.6 Izvedba del za prilagoditev nove opreme

Pri izvajanju zamenjave postrojenja so se izvedla nekatera prilagoditvena dela, ki so zajemala elektro inštalacije, pripravo oz. popravilo fundamenta in prilagoditev obstoječih cevi za vodno paro, olje in vodo.

Najzahtevnejša in najobsežnejša dela so bila izvedena na cevni sklopih, pri čemer so cevi za pretok olja in vode izdelane iz nerjavečega materiala inox 304L ter cevi za vodno paro iz ogljikovega jekla oznake SA355P11. Nerjaveče cevi, ki povezujejo mazalni sistem s turbo-generatorskim postrojenjem, so bile v večini predelane od prehoda s spodnje ravni na zgornjo, kjer je bila montirana nova oprema. Cevni sklopi so se delno ponovno uporabili in na strani nove opreme predelali v nov razvod in v večini tudi dimenzijsko reducirali. Pripravljena je bila tehnična dokumentacija, ki je izhajala iz prvotnega razvoda in bila ustrezno spremenjena s kosovnico in rezo listo cevi. Varilni postopek za nerjaveče cevi je sledil navodilom, prikazanim na sliki 39, ki je bil pripravljen v podjetju Flenco, d. o. o., katero je del enakega konzorcija kot podjetja Turbimaq Europe in je bilo zadolženo za nabavo cevni elementov in izdelavo varilne tehnologije.



Slika 40: Stanje cevi med premontažo

Vir: (Turbimaq)



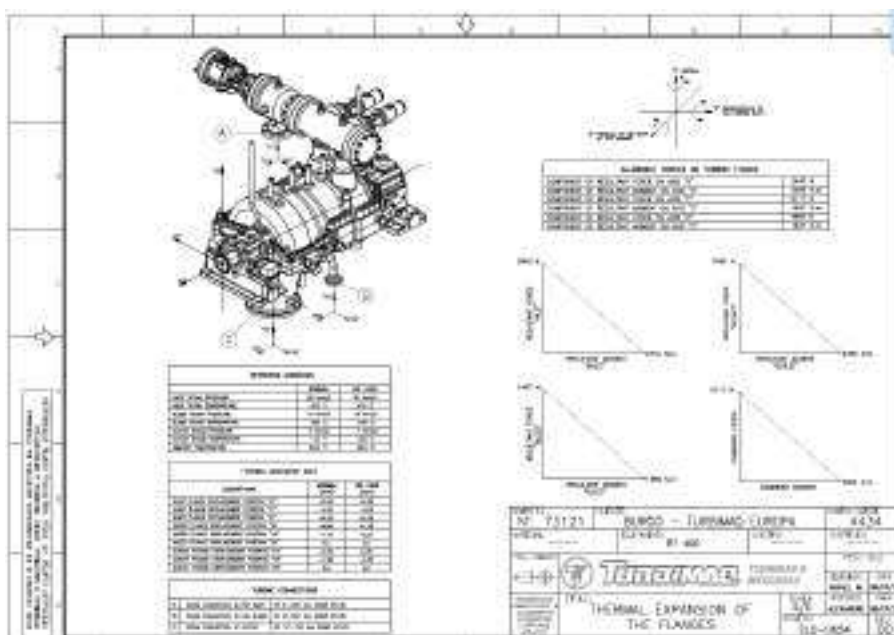
Slika 41: Stanje cevi po pranju in finalni montaži

Vir: (Turbimaq)

Cevi za dovod in odvod vodne pare so zahtevala popravke v dimenziji zaradi pri dovedu manjših priključnih mer na prirobnici parne turbine, pri čemer se je cevarija delno reducirala iz 8" na 4" ter dodatno vgradil Y-strainer. Na cevariji za odvod pare niso bila predvidena dela,

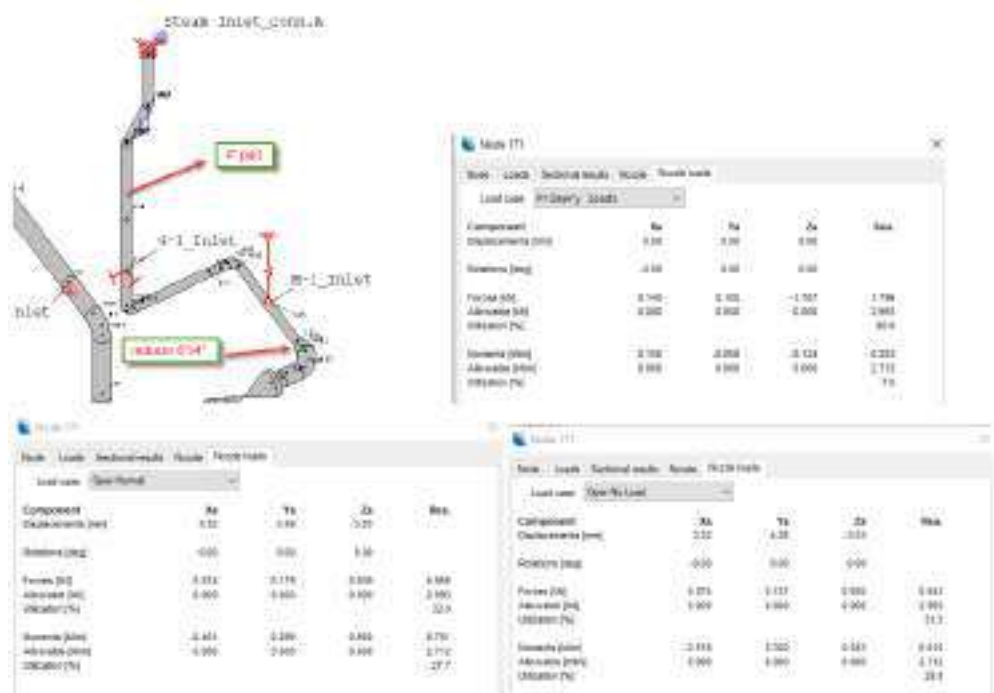
vendar se je zapletlo ob postavitvi nove parne turbine na obstoječ temelj, saj priključna prirobnica dimenzije 14" ni bila na predvidenem mestu, ampak 130 mm zamaknjena, zato so bila posledično potrebna prilagoditvena dela.

Za del parne cevarije, ki je priključena na parno turbino, so bila izvedena termodinamične kalkulacije sil in napetosti v podjetju Engineering Zagreb s programom Rohr2. Termodinamični izračuni so potrebni za sisteme parnih cevi, saj omogočajo, da se ocenijo delovanje, raztezanje in učinkovitost sistema. Na podlagi izračuna prenosa toplote med paro in materialom cevi, ki lahko vpliva na splošno učinkovitost sistema, se optimizirajo zasnove cevi in izbere ustrezno izolacijo za zmanjšanje toplotnih izgub. Ob upoštevanju pretoka in hitrost pare se določi porabe energije in padec tlaka. Z izračunom pretoka in hitrosti se določi optimalni premer cevi in v našem primeru najoptimalnejšo točko predelave oz. zmanjšanja premera cevi. Pri izračunu se določijo toplotna raztezanja materiala in posledično določijo točke pritrdjevanja in obešanja cevi na okoliško konstrukcijo. V našem primeru je bilo dodatno montirana vzmetno obešalo. Na splošno imajo termodinamični izračuni ključno vlogo pri načrtovanju, optimizaciji in vzdrževanju sistemov parnih cevi. Z zagotavljanjem, da sistem deluje pri želenih pogojih in maksimira energetska učinkovitost, lahko inženirji zmanjšajo operativne stroške, skrajšajo čas izpadov in izboljšajo splošno delovanje sistema. Na sliki 42 so prikazane termodinamične razteznosti na parni turbini in njene omejitve ter na sliki 43 izvleček iz kalkulacije cevi, pripravljene v programu Rohr2, in točka predelave cevi.



Slika 42: Termodinamične razteznosti na prirobnici turbine

Vir: (Turbimaq)



Slika 43: Termodinamične razteznosti na vhodni cevvariji

Vir: (Turbimaq)

Cevarija za dovod vhodne pare je izbrane kakovosti na podlagi tlačne stopnje in temperature medija. Ker nazivno temperaturno območje 500 °C se izvedba predelave in varjenja cevnih spojev mora opravljati v kontroliranem območju varjenja. To pomeni, da je treba cevi pred varjenjem lokalno predgreti, za dodatni material uporabiti ustrezne elektrode in po varjenju kontrolirano cevi tudi ohlajati. Sledijo še NDT-testi na vseh varjenih spojih. Na sliki 44 je prikazana ena od cevi v postopku kontroliranega ohlajevanja po varjenju ter na sliki 45 poročilo o toplotni obdelavi varjene cevi in spoja.



Slika 44: Termična obdelava varjene cevi

Vir: (Turbimaq)

 ISPECO Ispezioni Controlli s.r.l.		CERTIFICATO TRATTAMENTO TERMICO Heat treatment report		N. TT-0203-21-ENI	
CLIENTE Customer: DB SERVICE SRL		ORDINE Order:		IMPRESA COSTR. Manof. Company: DB SERVICE SRL	
IMPIANTO Plant: CARTIERA BURGO TOSCOLANO MADERNO (BS)		N° FABBRICA Serial No:		DISEGNO Drawing: ALLEGATO	
OGGETTO Object: LINEA 8"-101-HS-AS-1					
MATERIALE Material: P11		DIMENSIONI Dimensions:			
APPARECCHIATURA: Machine: SICORT					
TIPO TRATTAMENTO: Type of heat treatment: DISTENSIONE					
CICLO Cycle					
Salita libera fino a: 300 °C Free heating until:					
Gradiente termico positivo da: 300 °C a 680 °C °C/h: 120 Positive thermal gradient from to					
Stasi a: 680 °C per h.: 1 Permanence at time					
Gradiente termico negativo da: 680 °C a 300 °C °C/h: 120 Negative thermal gradient from to					
Discesa libera da: 300 °C a temperatura ambiente: SOTTO ISOLANTE Free cooling ambient temperature: under insulate					
PUNTA	GIUNTI	LINEA	SK	FG	D.N.
5	W11	8"-101-HS-AS-1	-	-	8"
6	W11	8"-101-HS-AS-1	-	-	8"
Note:					
Allegato: Il diagramma delle misure ottenute dai dispositivi di controllo e registrazione (pagina 2)					
OPERATORE Operator: BOUAZIZI M.		ENTI Surveyors:			
DATA/date: 27/12/2021		 ISPECO S.r.l. BOUAZIZI Mohamed Via Trieste 111 17047 VADO LIGURE (SV)			

Slika 45: Certifikat termične obdelave cevi

Vir: (Ispeco)

Po izvedbi predelave cevarije za vodno paro se ta pritrdi na opremo, montirajo se podporni nosilci in izolacija na vseh delih parne cevarije. (Europe, projektna dokumentacija: Toscolano CTE. Turn Key installation and start up of new turbine model RT400. Interno gradivo, 2021)

5.7 Končno izravnavanje opreme

Kritično dejanje v montažnem procesu je zagotavljanje ustreznega niveliranja gredi med glavnimi tremi elementi postrojenja, ki so parna turbina, glavno gonilo in generator. Vsak izmed teh elementov je pozicioniran na lasten ločen podest in pritrjen na temelje. Predhodno za izvedbo postopkov, opisanih v predhodnih točkah, se izvede grobo izravnavanje opreme med seboj po višini, distanci med gredmi in x y usmeritvi. Za doseganje izravnavanja se pod naležnimi površinami opreme vstavljajo kovinske ploščice za dvigovanje in spuščanje po višini

ter izravnalni vijaki za popravke v smeri x oz. vodoravne popravke. Po dosegu ustrezne izravnave se pritrilni vijaki končno pritezajo, ob tem se uporabi momentni ključ za enakomerni priteg. Končni dimenzijski rezultati so podani v poročilu slike 46, dodatno pa je na sliki 47 podan prikaz gredi pred spojitvijo. Pri tem dodamo informacijo, da je med parno turbino in glavnim gonilom montirana fleksibilna sklopka ter med glavnim gonilom in generatorjem zobniška spojka.

		FIELD SERVICE TECHNICAL REPORT		Nº RHT	
		RHT = Relatório de horas trabalhadas			
Customer: BURGO ITALIA		Contact: Jaka Bradac			
Equipment: Turbo Gear Set		Model: RT400 /TA56-N /WEG		Driven equipment: Generator	
Equipment #: TU-73121 RE-RT1641		Year: 2021		Others:	
SERVIÇOS EXECUTADOS					
☐ Work: () Disassembly (X) Assembly (X) Start up					
☐ Technical Visit (Check / Data gathering)					
☐ Others (Specify)					
☐ Technical Assistance					
☐ Comercial Visit					
WORK PERFORMED					
					
STEAM TURBINE / GEARBOX FINAL ALIGNMENT					
RADIAL			AXIAL		
+0,10mm			0,06mm		
0,00mm	+0,20mm	0,00mm	0,04mm		
0,00mm			0,00mm		
Speed reducer higher and offset to the left of the turbine			500 MM GAP		
10mm shims were added under the generator baseplate for alignment between the speed reducer and gearbox					
SPEED REDUCER / GENERATOR FINAL ALIGNMENT					
RADIAL			AXIAL		
+0,05mm			0,03mm		
0,00mm	+0,10mm	0,00mm	0,04mm		
0,00mm			0,00mm		
Generator is higher and offset to the left of the speed reducer			10 MM GAP		

Slika 46: Certifikat izravnavanja opreme

Vir: (Turbimaq)



Slika 47: Prikaz spojke gredi opreme

Vir: (Turbimaq)

5.8 Zagon postrojenja

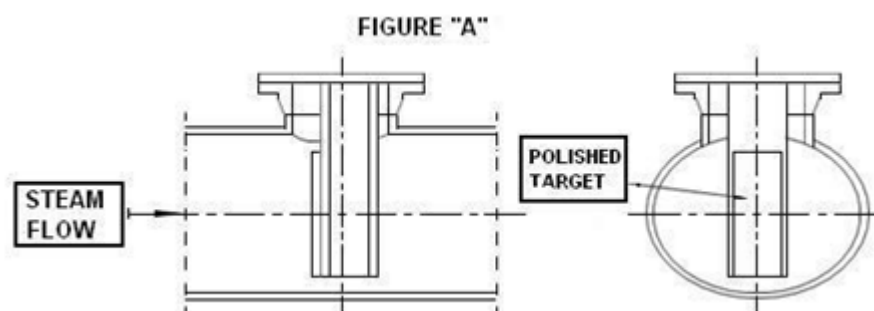
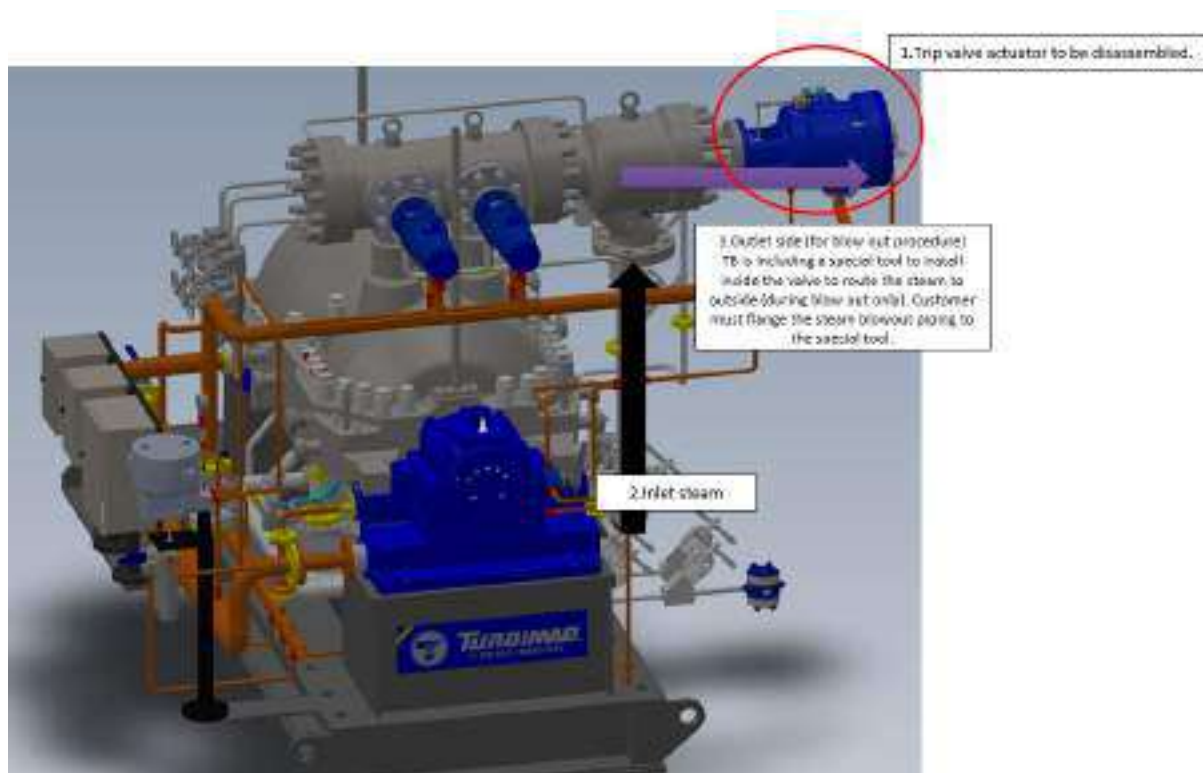
Po končani izvedbi mehanskih in elektro inštalacijskih del je program predvideval zagon postrojenja, ki mu sledijo koraki preverjanja vseh fizičnih oz. s kabli povezanimi signali na postrojenju in elektro omaro. Le-ti se preverjajo na pravilno povezavo in preverjanje izolacijske upornosti vsake povezave, da se ugotovi, ali so vse elektro inštalacije brezhibne in nepoškodovane. Sledi priklop regulacijskega dela elektro omar na električni vir in se vklopijo krmilni elementi ter se napajanje za vsak od kontrolnih in regulacijskih inštrumentov na postrojenju. Po tem priklopi se na nivoju PLC-programiranja povežejo digitalni in analogni signali ter se ustrezno poimenujejo, da so v skladu s funkcijskim diagramom in električno vezalno shemo projekta.

Analogni in digitalni inštrumenti se konfigurirajo, pri čemer se preverijo območja delovanja pri kontrolnih inštrumentih, npr. tlačni merilniki in na tlačnih stikalih območje nastavljenih preklonov in njihov odziv oz. območje preklopa.

Preverjanju signalov inštrumentov sledi napolnitev rezervoarja za mazalno olje na mazalnem sistemu ter priprava opreme na oljni flushing oz. oljno pretočno čiščenje mazalnih cevi tako dovodov kot odvodov. Za ta namen se glavni elementi postrojenja, kot so parna turbina, gonilo in generator premostijo s cevmi ali se na vhodu v elemente montirajo prečiščevalne mrežice. Zagonu oljnega sistema in postopku čiščenja sledi predvideno tridnevno preverjanje čistoče, pri čemer morajo biti zagotovljene veličine olja, kar pomeni temperature v območju 66–71 °C in tlak, enak delovnemu tlaku, v našem primeru na glavnih elementih 15 barg.

Naslednji korak po ponovnem priklopu glavnih elementov na oljni sistem je bil izveden preizkus lifting oil sistema oz. sistema za dvig gredi generatorja, pri čemer je bila inštalirana oljna črpalka z nazivnim tlakom 84 barg in pretokom 2,1 l/min. Ta sistem omogoča, da se gred generatorja dvigne z naležne površine drsnih ležajev in se omogoči mehki zagon obratovanja, enak postopek se uporablja pri zaustavitvi sistema. Temu sledi testiranje obračalnega gonila, ki je montirano na glavno gonilo. Le to s prenosom obrača KPL-postrojenje 150 obratov na minuto in s tem se izvede mehki zagon kompletnega postrojenja. Tudi ta ima funkcijo ob zaustavitvi postrojenja, saj ob ohlajevanju opreme poskrbi, da ne pride do deformacije gredi tako turbine kot generatorja zaradi lastne teže.

Zadnje dejanje priprav na zagon je flushing oz. čiščenje dovodnih parni cevi in le to je tehnično zelo zahteven postopek. Izvede se na način, da se dovodna cev v parno turbino premosti s cevno inštalacijo, ki se usmeri proti varnemu območju za kontroliran izpust vodne pare v okolico. Ob tem se regulacijski del zapornega ventila odstrani in se na njegovo mesto montira premostitveni element, v cevovod kateri vodi v varno območje se montira element, kateri ima vstavljen ploščo oz. target plate, ki je narejena iz poliranega aluminija in je postavljena pravokotno na smer pretoka. Cilj je, da se preveri, koliko odtiskov delcev iz cevi se razbere ob pretoku vodne pare. Nazivne veličine vodne pare so enake delovnim pogojem in cilj, da se čiščenje izvede ustrezno, je vpihovanje, ki traja od 10 do 15 minut z intervali ustavljanja od 2 do 3 ure, da se omogoči nihanje temperature v dovodni cevi za paro. Merila sprejemljivosti čiščenja morajo biti v skladu z API 686 in pomeni, da je tarča z največ 3 oznakami/cm² in največ 1 mm premera. Na sliki 48 je prikazano, kje se premosti parna turbina in shema montaže plošče za meritev čistoče. Postopek je izjemno zahteven za okolico, saj se v trajanju prepihanja v okolico širi zelo visoka raven hrupa. V ta namen je treba dodatno montirati dušilec zvoka na izhodu.



Slika 48: Prikaz priprave za prepihovanje cevi vodne pare

Vir: (Turbimaq)

Po končanju zagonskih aktivnosti se je oprema oziroma cevni priklopi in odmontirani elementi ponovno montirali in priklopili na elektro opremo in ostale sisteme. Zagon je bil kontrolirano izveden, pri čemer se postopoma izvaja zagon oljnega sistema, nato pa se odpre dovodni ventil vodne pare, pri čemer se izvede kontroliran postopek ogrevanja parne turbine in traja več ur. Parna turbina se do polnih obratovalnih pogojev oziroma obratov zvišuje v prednastavljenem programu guvernerja oz. tako imenovanem rampup postopku do v našem primeru dosega 10.500 obratov na minuto. Po dosegu polnih obratov se generator postopoma aktivira in se izvedejo meritve vibracij opreme, temperature na merilnih mestih opreme. Naknadno se ob

polni obremenitvi postrojenja izvedeta prvi priklop na omrežje in sinhronizacija z omrežjem. Ves postopek traja nekaj ur.

5.9 Funkcionalni test postrojenja in prevzem

Po končanju zagona opreme se je izvajalo pet dnevno performance testiranje opreme, pri čemer se preverja zanesljivost delovanja in spremljanje proizvedene električne energije. Za končno določanje delovanja postrojenja in ugotavljanje ustreznosti so bili izvedeni 30-minutni testi, pri čemer so se ročno zapisovali podatki iz nadzornega ekrana na elektro omari. V zbranih podatkih je prihajalo do nekonsistentnosti s predvidevanji v porabi vodne pare, ki je bila merjena na podlagi meritev na pretočni merilni zaslonki, ki odčitava razliko med vstopnim in izstopnim tlakom. Merilec pretoka FI700 je ob garantiranem vstopnem izstopnem tlaku v skladu s tabelo za delovanje ter vstopni in izstopni temperaturi v skladu s tabelo pokazal v povprečju 7,5 % višjo porabo vodne pare kot predvidevano. Le-to je pripeljalo do v danem trenutku neuspešnem prevzemnem testu. V nadaljevanju se je z naročnikom ugotavljalo o nepravilnosti dobavljene opreme in morebitne neustrezne opreme za meritev veličin med preizkusom. Glavni ugotovljen vzrok je bil merilec pretoka FI700, saj je bil inštaliran na 8-inčne cevi, ki je bila izdelana v skladu s potrebami predhodno montirane in zamenjane impulzne turbine. Obratovalno območje je bilo izven idealnega območja meritve. Po večkratnih poizkusih ugotavljanja ustrezne učinkovitosti postrojenja je bila izvedena primerjalna analiza branih rezultatov, pri čemer se je vključil merilec za dovajanje vode v tlačni kotel za proizvodnjo vodne pare in merilec pretoka vodne pare na postrojenju za parno turbino. V tabeli 7 so prikazani rezultati prvega testa, izvedenega po zagonu; v stolpcu t/h je prikazana razbrana poraba vodne pare.

Tabela 7: Tabela prikazuje rezultate prvega testa

Test condition: constant backpressure 3,00 barg and KWe 3930

Test condition: constant electrical power						
Time(min)	TE-600 (°C)	PIT-600 (barg)	TE-617 (°C)	PIT-604 (barg)	Energy (kW)	t/h
5`	469,59	57,81	179,65	3,02	3930	29
10`	465	57,77	177,75	3,02	3940	29,2
15`	470,59	57,87	180,25	3,03	3930	28,9
20`	471,09	57,84	180,35	3,01	3940	28,9
25`	469,29	57,89	179,15	3,01	3940	29
30`	468,39	57,85	178,65	3,02	3945	29
35`	467,69	57,81	178,45	3	3945	29
40`	468,49	57,84	179,25	3	3940	29
45`	469,29	57,86	177,35	2,95	3930	28,8

Vir: (Turbimaq)

V nadaljevanju je bila izvedena analiza opreme in opravljeni so bili dodatni testi s parno turbino. Za teste s 3.930 kW nazivno močjo je bil poleg merilnika pretoka vstopne pare in dovoda vode v bojler uporabljen še tretji merilnik pretoka za parno turbino (DPT114). Podatki, zbrani med končnimi preizkusi, so naslednji in prikazani v tabeli 8. Kot je razvidno, so bili dodani

povprečni zneski zbranih meritev. Razvidno je, da merilec FI700 kaže enake vrednosti kot predhodni testi. V nadaljevanju je razvidno, da se meritve na merilcih za dovod vode v bojler in na izhodu turbine približujejo ciljnim vrednostim. Na podlagi teh ugotovitev so inženirji podjetja Turbimaq pripravili tabelo in graf s popravno krivuljo, ki upošteva izgube in napake na merilnih inštrumentih.

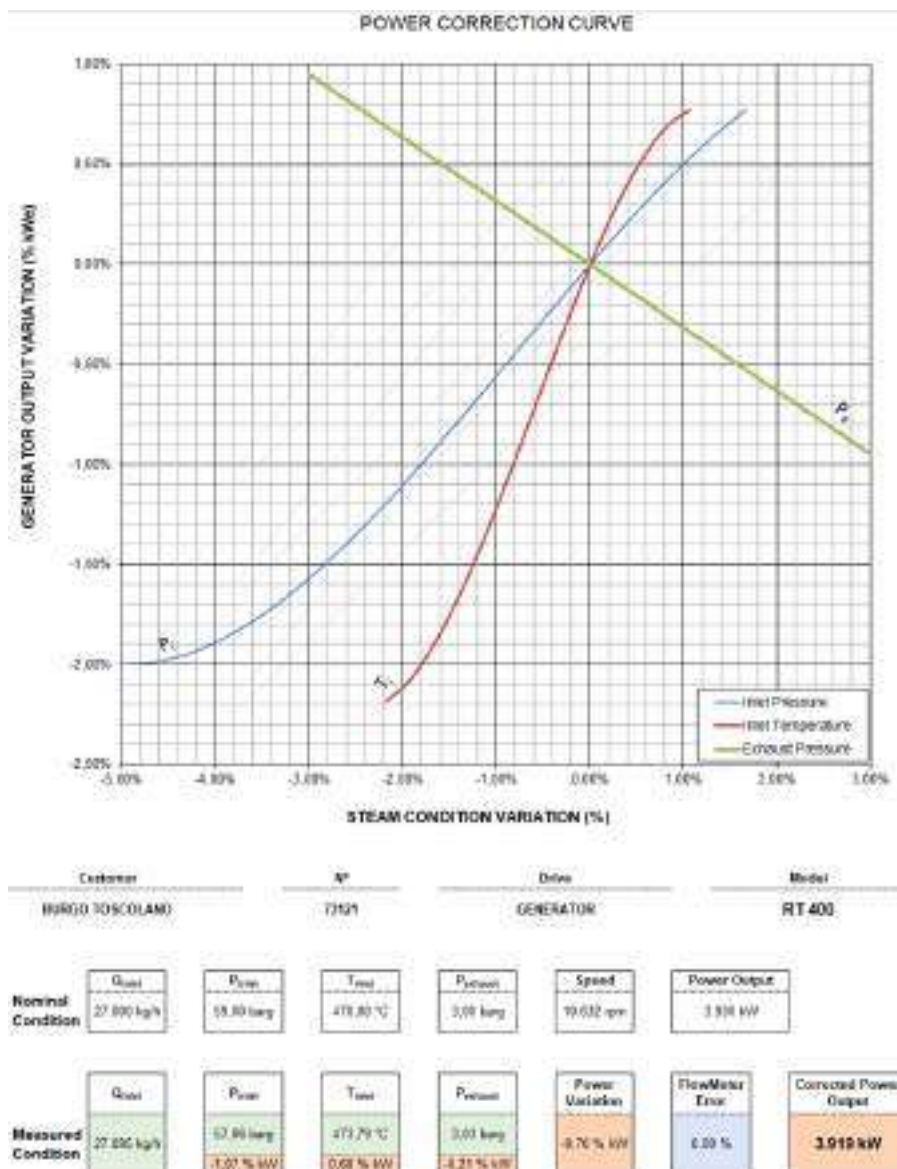
Tabela 8: Tabela prikazuje rezultate testa pred končnim sklepom

Test condition: constant backpressure 3,00 barg and KWe 3930

Time (min)	TE- 600 (°C)	PIT-600 (barg)	TE- 617 (°C)	PIT-604 (barg)	Energy (kW)	Flow (kg/h)		
						Inlet Steam	Feed Water to Boiler	DPT114
5'	474,09	57,65	174,75	3,06	3.930	29.400	25.700	27.700
10'	475,80	57,92	177,55	3,01	3.930	29.000	30.400	27.300
15'	473,29	57,90	176,15	3,05	3.900	29.400	27.400	27.800
20'	472,99	57,91	176,35	3,06	3.930	29.300	28.900	27.500
25'	472,59	57,80	173,24	3,01	3.930	29.300	27.200	27.600
30'	473,99	57,95	171,94	3,01	3.910	28.900	28.000	27.600
						I		
AVG	473,79	57,86	175,00	3,03	3.922	29.217	27.933	27.583

Vir: (Turbimaq)

Z analizo podatkov, izmerjenih v več poizkusih, je razvidno, da v zbranih meritvah pretoka ni doslednosti podatkov. Vsak merilnik pretoka ima drugačno meritev s povprečnimi odstopanji 7,25 %, kar ni primerno za preizkus delovanja turbine. Meritev, ki najbolj izstopa, je stopnja pretoka pare na vstopu, saj je veliko višja od drugih meritev, kar pomeni, da je ta meritev izven meja. Poleg tega se bistveno razlikujeta tudi pretok vode v kotel in pretok izstopne vodne pare. V primerjavi z merjenjem vstopne pare je razlika veliko manjša. Te ugotovitve kažejo, da je dejanska vrednost pretoka pare bližje izmerjenim vrednostim napajalne vode kotla. Ko se termodinamično ravnotežje izvaja z meritvijo pretoka vstopne pare, preverimo, ali pričakovana temperatura izstopne pare odstopa od izmerjenih vrednosti (TE-617). Povprečna temperatura izstopne pare, izračunana s termodinamično primerjavo, je 5,49 °C višja od temperature, izmerjene na izhodu iz turbine, kjer je bil inštaliran pomožen merilnik temperature. Nad analizo podatkov po termodinamičnih tabelah je bilo ugotovljeno, da obstaja nedoslednost glede merjenja pretoka pare pred turbino. Termodinamično je pretok napajalne vode kotla obravnavan kot meritev, ki se najbolj približa dejanski vrednosti. Na sliki 49 so te vrednosti prikazane v razmerju s krivuljo turbine in dejavnikom napake ter dokazuje, da je učinkovitost parne turbine in postrojenja enaka pričakovanim vrednostim.



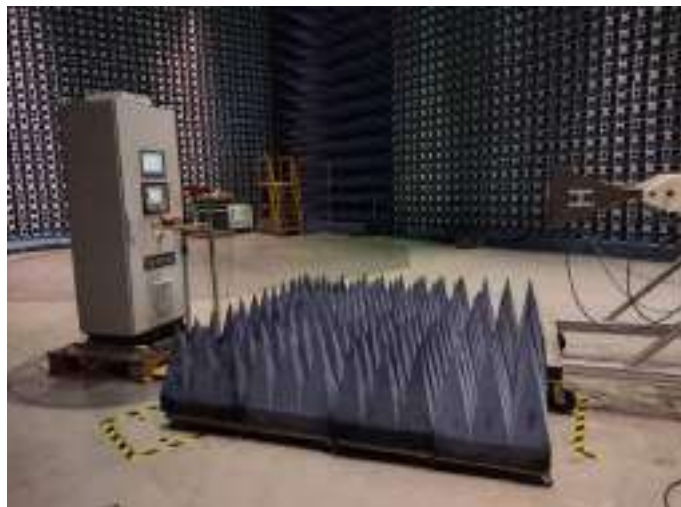
Slika 49: Tabela prikaza dejanske učinkovitosti postrojenja in vhodne podatke

Vir: (Turbimaq)

Pri izmerjenih podatkih za preskus 3.930 kWe bi morala biti proizvedena moč 3.919 kW (oblika korekcijske krivulje). Izmerjena proizvedena moč je bila 3.922 kWe, turbina proizvede 0,08 % manj od pričakovane za dane razmere pare. Pri preverjanju performance postrojenja je bilo ugotovljeno, da kljub vstopnim in izstopnim pogojem, ki se razlikujejo od projektne tabele, skupni izkoristek parne turbine, reduktor in generatorja ustrezajo garancijski učinkovitosti, ki je bila določena pri 84,4 %, z upoštevanjem ustrezne projektne tolerance 1 %. Dejanska dokazana učinkovitost je manjša za 0,58 %. (Europe, projektna dokumentacija: Toscolano CTE. Turn Key installation and start up of new turbine model RT400. Interno gradivo, 2021)

5.10 Izjava o skladnosti

Dobavljena oprema je bila izdelana v Braziliji, ki je država izven Evropske unije in posledično ni zavezana za izdelavo opreme v skladu z izjavo o skladnosti. V ta namen je podjetje Turbimaq izdelalo tehnično dokumentacijo za lasten proizvod parne turbine in elektro omaro za regulacijo parne turbine, ki sta bila konstrukcijsko in razvojno izdelana v podjetju. Za potrebe pridobitve izjave o skladnosti je bilo za izvedbo postopka angažirano zunanje svetovalno podjetje. Treba je dodati, da je podjetje Turbimaq Turbinas e Maquinas s projektom, predstavljenim v tej diplomski nalogi, prvič dobavilo opremo za montažo v Evropski uniji. Posledično zaradi dodatne zahtevnosti priklopa opreme na italijansko električno omrežje je bilo treba izvesti postopke pridobitve izjave o skladnosti in posledično CE-oznako v skladu z EN12100:2010 European directives. V podjetju se je postopek konstruiranja opreme spremljal z zunanjim svetovalcem, hkrati pa sta se pripravljala tako dokumentacija kot ocena tveganja. Kot zanimivost dodam, da je bila elektro omara podvržena tudi emisijskim testom, sevnim testom, preskusu emisije elektrostatične razelektritve ipd., pri čemer so se simulirali pogoji v laboratoriju za testiranje, kar prikazuje slika 50.



Slika 50: Prikaz elektro omare v testnem prostoru

Vir: (Turbimaq)

Stranki se je ob predaji opreme in uspešno izvedenem zagonu ter preizkusu predala tehnična dokumentacija, ki je zajemala tehnične opise opreme, elektro vezalne sheme, oceno tveganja in navodila za uporabo v skupni velikosti 455 strani. Dodatno je bil pripravljena datoteka, v kateri so zajeti vsi tehnični opisi in poročila izdelave opreme vseh dobaviteljev v skupni velikosti 3300 strani. Navodila za uporabo so bila pripravljena v matičnem jeziku uporabnika, tj. italijanščini.

6 KROVNA TEMA: VODENJE STROKOVNEGA PROJEKTA IZ STROJNIŠTVA

Vodenje strokovnega projekta v strojništvu zahteva od projektnega vodje poznavanje osnovnih načel in principov projektiranja, upravljanja opreme in izvedbo projektov iz strojništva. Vodenje projekta mora upoštevati nekatera osnovna področja, da se zagotovi ustrezna izvedba. Ta področja se nanašajo na varnost delovanja opreme, varnost rokovanja z opremo, varnost gradnje opreme, časovni načrt projekta in stroškovni načrt projekta. V večini se projektni vodja zanaša na naslednje smernice:

Določitev ciljev projekta se začne z jasnim določanjem ciljev in rezultatov projekta in določitvijo ključnih nalog in časovnega okvirja izvedbe. Potrebno je iskanje strokovnjakov, ki bodo sodelovali pri izvedbi projekta, določitev vlog posameznikov in oblikovanje struktur komunikacije med osebami, ki sodelujejo pri projektu. Pri načrtovanju projekta se izdelata podroben časovni razpored aktivnosti. Določijo se ključni mejniki projekta za oceno uspešnosti med izvajanjem in za pomoč sledljivosti napredka. Ko se načrt pripravi in se začne izvajati, mora vodja zagotoviti, da se aktivnosti izvajajo v skladu z načrtom. Potrebno je komuniciranje z ekipo in zagotovitev, da so vsi udeleženi seznanjeni z aktualnim stanjem projekta. Prepoznati je treba morebitna tveganja, ki bi lahko vplivala na izvedbo projekta, in razviti ter izvajati strategije za njihovo obvladovanje. Komunikacija s stranko ali naročniki se izvaja vzporedno z izvajanjem projekta. Zagotovi se, da so seznanjeni z napredkom ali spremembami pri izvedbi projekta, za katere je nujno, da se strinjajo, če se spremembe nanašajo na delovanje, učinkovitost, upravljanje ali varnost izvedbe projekta oziroma opreme.

Varnost pri izvedbi projektov v strojništvu je izredno pomembna. V Evropski uniji so smernice podane v enotnih varnostnih direktivah, ki jih vsak proizvajalec in integrator opreme po končanem projektu zagotavlja in dokazuje z izjavo o skladnosti. Za zagotavljanje varnosti se pred prevzemom opreme s strani naročnika izvajajo usposabljanja zaposlenih za ustrezno rokovanje z opremo in ustrezno vzdrževanja, kar je eden ključnih dejavnikov pri zagotavljanju varnosti. Zaposleni ali upravljavci opreme se usposobijo o namestitvi opreme, uporabi opreme, redno pregledovanje in vzdrževanje opreme in varno rokovanje z opremo med njenim delovanjem. Poskrbi se za ustrezno zaščitno opremo in identifikacijo tveganj in potrebo za uporabo določene zaščitne opreme. Tukaj se izdelata ocena o tveganju, kar je sestavni del izjave o skladnosti. Naročnika se seznani z oceno ter ustrezno usposobi z navodili in priporočili. Če

pride do kakršnih koli neskladij pri delovanju varnostnih sistemov, je treba izvajati popravne ukrepe in ugotovitve vzroka.

Ob zaključku projekta se naredi analiza izvedbe. Specificirajo se odstopanja od predvidenega prvotnega obsega projekta, tako pozitivne kot negativne. Predvsem ob negativnih ugotovitvah je treba izvesti ugotavljanje vzroka in izpeljati aktivnosti za popravo oz. preprečitev enakih vplivov ali razlogov v prihodnje.

7 SKLEP

Diplomsko delo je bilo pripravljeno s ciljem predstavitve strojne opreme. Ob tem je bilo predstavljeno podjetje Turbimaq Europe in aktivnosti le-tega na Evropskem tržišču, v katero je podjetje vstopilo na osnovi sodelovanja s podjetjem Turbimaq Turbinas e Maquinas. Projekt je zajemal inovacijo podjetja pri razvoju in izvedbi prvega projekta z reakcijskim tipom parne turbine kot tudi prvega projekta z uspešno realizacijo na tržišču. Kot vodja projekta sem izpostavil zahtevnost združevanja več dobaviteljev in kompleksnosti izvedbe opisanega projekta ter zahtevnosti časovnega načrta.

Podjetje Turbimaq Europe je z izvedbo projekta zamenjave manj učinkovite impulzne parne turbine z menjavo za učinkovitejšo tipa RT400 na trg postavilo učinkovitejšo alternativo opreme in dokazalo sposobnost izvajanja kompleksnih nalog. Podjetje bo pridobljene izkušnje in znanje v prihodnje uporabilo za izvedbo podobnih projektov in izpostavilo pomen zanesljivosti tako izvedbe projektov kot delovanje opreme. Velik pomen pri izvedbi takšnih projektov je časovni načrt, katerega pomen skladnosti z danim strankam omogoča čim krajše zastoje v transformaciji v bolj učinkovito opremo. Posledično se finančni vložki ustrezneje in hitreje povrnejo. Glede na trenutno situacijo v energetske sektorju in cene proizvedene električne energije je stranka poslala povratno informacijo, da se bo projekt rentabilno izplačal hitreje od pričakovanj. Pri tem dejstvu je treba dodati, da je stranka naročila opremo pred vsesplošno draginjo, katere posledica so globalne gospodarske in ekonomske spremembe v letih 2022 in 2023.

V diplomski nalogi smo zastavljene štiri hipoteze potrdili in dokazali:

H1: Uporaba parne turbine tipa reakcijska omogoča večji izkoristek vhodnega medija pri pretvorbi v mehansko energijo kot parna turbina tipa impulzna.

H2: Investicija v nadgradnjo ustrezno delujoče opreme se za investitorja obrestuje, če sta učinkovitost in izkoristek večja.

H3: Preventivna kontrola dejanskega stanja mesta montaže minimizira možnosti zapletov in dodatnih stroškov pri izvedbi zamenjave opreme

H4: Učinkovitost moderniziranega postrojenja procesa proizvodnje električne energije je bila dosežena. Dokaz je višja proizvodnja električne energije ob enaki uporabi vhodnega medija.

Sklepi vseh štirih hipotez so predstavljeni v nadaljevanju.

Hipoteza **H1** je bila potrjena na podlagi strokovnega gradiva, uporabljenega v diplomskem delu, kjer je bila opisana tehnologija opreme ter podana primerjava tako impulzne kot reakcijske parne turbine in njenih strojnih elementov.

Hipoteza **H2** je bila potrjena, proizvedena električna energija je večja in investitor je glede na makroekonomsko situacijo presegel predviden učinek vlaganja v modernizacijo svojega obrata. Dodamo tudi, da je investitor prav tako zamenjal eno od dveh plinskih turbin, ki sta vključeni v kombiniran cikel industrijskega obrata.

Hipoteza **H3** je bila potrjena, ob čemer je bilo ob izvedbi projekta ugotovljenih nekaj nepredvidljivih dogodkov, ki so finančno sliko izvedbe projekta spremenili v negativno smer. Glavni dogodki so letalski prevoz opreme od proizvajalca, neskladna lokacija priključitvenih parnih cevi in neustreznost oz. potreba po popravilu temeljev na lokaciji montaže.

Hipoteza **H4** je bila dokazana z zagonom opreme in primerjavo proizvedene električne energije v primerjavi s starim postrojenjem ob uporabi enake količine vhodnega medija. Razlika v proizvedeni energiji je ocenjena na približno 15 % več proizvedene električne energije ob enaki vloženi energiji.

V času pisanja se pripravlja nov projekt podobne sheme izvedbe za istega investitorja na drugi lokaciji. Predloge za uspešnejšo izvedbo temeljijo na natančnejšem načrtovanju proizvodnih aktivnosti izdelave opreme, natančnejšem pregledu obstoječe opreme oziroma predhodnem ugotavljanju ujemanja obstoječe opreme z na novo inštalirano opremo, natančnem izrisu sestavnih načrtov in prikazu vseh montiranih inštalacij na mestu montaže. Pri pripravi na končni prevzem mora podjetje izvesti analizo obstoječe merilne opreme, ki jo je, če ni v skladu z območji delovanja novega postrojenja, predhodno zamenjati z ustrežno in se tako izogniti zamudnemu dokazovanju učinkovitosti opreme med delovanjem.

8 VIRI, LITERATURA

- Chaplin, R. A. (2009). *Thermal Power Plants*. P.O.Box 2623, Abu Dhabi, U.A.E.: Eolss Publications.
- Europe, T. (2018). *Poslovni načrt. Interno gradivo*. Maribor: Turbimaq Europe.
- Europe, T. (2021). *Projektna dokumentacija: Toscolano CTE. Turn Key installation and start up of new turbine model RT400. Interno gradivo*. Maribor: Turbimaq Europe.
- Heinz Bloch, M. S. (2008). *Steam Turbines: Design, Application and Re-Rating 2nd Edition*. Maidenhead, Berkshire, United Kingdom: McGraw Hill.
- Maquinas, T. T. (2020). *Predstavitev podjetja in program*. Piracicaba: Turbimaq Turbinas e Maquinas.
- Maquinas, T. T. (2021). *Projektna dokumentacija Turbine Model RT400*. Piracicaba: Turbimaq Turbinas e Maquinas.
- Tomšič, U. (9. 12. 2010). <https://studentski.net>. Pridobljeno iz https://studentski.net/gradivo/ulj_fmf_fil_jte_sem_parna_turbina_01:
- Trop, B. (2011). *Obratovanje bloka 5 Teš po izgradnji plinske turbine PT51*. Maribor: Univerza v Mariboru.